

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

SHIVELLY LOS GALETTO

EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA INFLUENCIADA PELA APLICAÇÃO DE
GESSO AGRÍCOLA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

PONTA GROSSA – PR
2016

SHIVELLY LOS GALETTO

EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA INFLUENCIADA PELA APLICAÇÃO DE
GESSO AGRÍCOLA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

Tese apresentada junto ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Ponta Grossa para a obtenção do título de Doutora em Agronomia – Área de Concentração em Agricultura. Linha de Pesquisa: Uso e Manejo do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires.

PONTA GROSSA – PR
2016

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

G154 Galetto, Shivelly Los
Eficiência da adubação fosfatada
influenciada pela aplicação de gesso
agrícola em sistema plantio direto/
Shivelly Los Galetto. Ponta Grossa, 2016.
201f.

Tese (Doutorado em Agronomia - Área de
Concentração: Agricultura), Universidade
Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero
Caires.

1.Glycine max (L.) Merril. 2.Triticum
aestivum (L.). 3.Latossolo. 4.Fósforo.
5.Fosfogesso. I.Caires, Eduardo Fávero.
II. Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Doutorado em Agronomia. III. T.

CDD: 631.4



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Tese: **“Eficiência da adubação fosfatada influenciada pela aplicação de gesso agrícola em sistema plantio direto”.**

Nome: Shivelly Los Galetto

Orientador: Eduardo Fávero Caires

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol

Prof. Dr. Helio Antonio Wood Joris

Dr.ª Nátaí Maidl de Souza

Dr. Gabriel Barth

Data da Realização: 16 de dezembro de 2016.

Aos meus queridos e amados pais,
Normando Galeto e Meriam Los
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por todas as graças recebidas.

A Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), em especial ao curso de Pós-Graduação em Agronomia pela estrutura, suporte e apoio prestado. Aos Professores desta Instituição, pela qualidade de ensino e contribuição à minha formação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal e Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de Doutorado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires, pela orientação e por todo o apoio, paciência, tranquilidade, excelência em seu profissionalismo, seriedade, comprometimento e ensinamentos. Agradeço-o pela oportunidade em fazer parte do Laboratório de Fertilidade do Solo, pela confiança depositada em mim, e por sempre compartilhar o seu vasto conhecimento de maneira inspiradora. Poucas serão as palavras para agradecer a importância que representou em minha carreira e em minha vida por ter me acolhido como sua orientada. Muito obrigada!

Aos meus pais, Normando Galeto e Meriam Los, por me ensinarem os verdadeiros valores na vida, trabalhar com ética, de maneira digna, honesta e com respeito a todas as pessoas. A eles, que sempre me motivaram e apoiaram, entenderam as minhas faltas e momentos de reclusão, e me mostraram o quanto é importante estudar, muito obrigada por tudo!

Ao Fabrício Siqueira Hennipman, meu querido companheiro, que esteve sempre presente, por toda ajuda, compreensão e paciência, pelo amor, carinho e incentivo dedicados em todos os momentos. Agradeço-o por participar de todas as etapas de realização e conclusão deste trabalho, sempre me ouvindo e colaborando com muita sabedoria para o aperfeiçoamento de minhas ideias e argumentos.

À estimada Família Massinham, pela concessão da área experimental e por toda ajuda, paciência e solicitude em contribuir para o máximo desempenho do experimento em campo.

Muito obrigada! Também agradeço ao Sr. Eumir Groff pelo apoio e concessão da área (franco-arenosa) no primeiro ano experimental, e, também, aos seus funcionários, principalmente ao Sr. Air Guera, por todo auxílio e atenção prestados a nossa equipe.

Ao Eng. Agrônomo José Antonio Malucelli, Empresa Agronelli, pela disponibilização do gesso agrícola. E, também, ao Eng. Agrônomo Valter Yassuo, Empresa Louis Dreyfus Commodities, pelo fornecimento do superfosfato triplo.

Aos queridos amigos e colegas Angelo Rafael Bini, Danilo Scharr, Adriano Haliski e Gabriel Soares por toda ajuda com os experimentos, força, compreensão, apoio, entusiasmo, palavras amigas e momentos de descontração. Obrigada por tudo!

A Dirce Aparecida de Oliveira pela sincera amizade, carinho, companheirismo, incentivo, palavras de conforto e, também, pelos indispensáveis ensinamentos e auxílio nas análises laboratoriais.

A todos os colegas e amigos do Laboratório de Fertilidade de Solo, que nunca mediram esforços para auxiliar nas coletas em campo e atividades laboratoriais rotineiras. A ajuda de vocês foi essencial para a realização deste trabalho. Meus sinceros agradecimentos: Alan Jean Oliveira, Felipe Moreira, Daniel Moreira, Alessandro Gruska, Aline Francine Amodio, Lucia Satomi Hirooka e Ana Cláudia Lubczyk.

Aos amigos e colegas da Pós-Graduação em Agronomia, em especial à Keli Guera, Jucimare Romaniw, André Auler, Hagata Siqueira Hennipman e Silvano Harkatin e, aos já Doutores, Helio Antonio Wood Joris e Nátali Maidl de Souza, pelo apoio, amizade, ensinamentos e palavras de incentivo.

Aos funcionários da Universidade Estadual de Ponta Grossa, principalmente, à Nilcéia Alvez de Lara, Zima Richter, Luciane Hennemberg, Jaqueline Aparecida Gonçalves e Rachel Govea da Silva por todo auxílio, apoio e amizade.

A todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA INFLUENCIADA PELA APLICAÇÃO DE GESSO AGRÍCOLA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a eficiência da adubação fosfatada influenciada pela aplicação de gesso agrícola para as culturas de trigo e soja, em sistema plantio direto. Para isso, foram realizados dois experimentos em campo e dois em ambiente protegido. Os experimentos no campo foram instalados em outubro de 2013 no município de Ponta Grossa – PR, em dois solos com diferentes classes texturais: um Latossolo Vermelho (LV) textura argilosa e um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura franco-arenosa. O delineamento experimental foi em blocos completos ao acaso, no esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas, foram aplicadas, no sulco de semeadura, quatro doses de P (0, 30, 60 e 90 kg P_2O_5 ha⁻¹) na forma de superfosfato triplo (SFT) e, nas subparcelas, foram empregadas doses de gesso agrícola (0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹), antes da semeadura da soja. Em ambos os solos, foram avaliados os efeitos imediatos dos tratamentos com P_2O_5 e gesso na cultura da soja. No Latossolo Vermelho argiloso também foram avaliados os efeitos dos tratamentos na sucessão de culturas trigo (2014) – soja (2014–15). Nesse caso, em cada cultivo de soja e trigo, as mesmas doses de P_2O_5 , na forma de SFT, foram aplicadas no sulco de semeadura, sendo avaliado o efeito residual da aplicação de gesso agrícola. Os experimentos em ambiente protegido foram realizados com as culturas de trigo e soja, em colunas indeformadas de solo. As colunas em PVC foram retiradas do Latossolo Vermelho utilizado no experimento de campo. O delineamento experimental utilizado, para cada cultura, foi em blocos ao acaso em esquema fatorial 3 × 2, com quatro repetições. Os tratamentos foram: controle, gesso agrícola e $CaSO_4.2H_2O$ puro, sem e com aplicação de P_2O_5 , na forma de SFT. A dose de gesso agrícola e de $CaSO_4.2H_2O$ puro foi correspondente a 6 t ha⁻¹ e a dose de P foi de 90 kg ha⁻¹ de P_2O_5 . Em todos os experimentos foram avaliados atributos químicos de solo, atributos de planta (extração de nutrientes e produção de massa seca) e atributos de raízes. Nos experimentos no campo foram ainda avaliados a diagnose nutricional, a exportação de nutrientes e o rendimento de grãos das culturas. As eficiências de aproveitamento do P também foram calculadas para culturas de trigo e soja. De maneira geral, observou-se que, em curto prazo, o gesso não influenciou a eficiência de uso do P (EUP) pela soja cultivada nos solos LV e LVA, mas o efeito residual do gesso aumentou a EUP pela cultura do trigo, até a dose de 5 t ha⁻¹, e também a EUP da soja, até a dose de 4,3 t ha⁻¹. Ajustando-se adequadamente as doses de gesso e as doses de P na semeadura, além da economia do fertilizante fosfatado, foi possível obter altas produtividades de grãos de trigo (acima de 4,5 t ha⁻¹) e soja (acima de 4 t ha⁻¹). Porém, observou-se, em todos os anos, que a dose mais elevada de P na semeadura (90 kg ha⁻¹ de P_2O_5) associada à dose mais elevada de gesso agrícola (6 t ha⁻¹), em solos que continham altos teores de P, prejudicou o crescimento radicular e o rendimento de grãos de trigo e soja. Nos experimentos em ambiente protegido, constatou-se que a aplicação de $CaSO_4.2H_2O$ puro juntamente com 90 kg ha⁻¹ de P_2O_5 na semeadura promoveu melhoria no sistema radicular e na produção de massa seca da parte aérea de plantas de trigo, e não interferiu na cultura da soja. Esses resultados comprovaram que a utilização de gesso pode aumentar a EUP e melhorar o desempenho produtivo das plantas de trigo e soja. Porém, a utilização de altas doses de P na semeadura associada com altas doses de gesso agrícola deve ser realizada com cautela, principalmente em solos que já apresentem teores adequados de P disponível, para que o desempenho das culturas não seja prejudicado.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merril. *Triticum aestivum* (L.). Latossolo. Fósforo. Fosfogesso. Sulfato de cálcio. Acidez do subsolo. Nutrição mineral.

EFFICIENCY OF PHOSPHATE FERTILIZER AS AFFECTED BY GYPSUM APPLICATION UNDER NO-TILL

ABSTRACT

The main objective of this work was to evaluate the efficiency of phosphate fertilization influenced by the application of agricultural gypsum for wheat and soybean crops under no-tillage system. For this, two experiments were carried out in the field and two in a greenhouse. The experiments in the field were installed in October 2013 in the municipality of Ponta Grossa – PR, in two Oxisols with different textural classes: a Red Oxisol (LV) clay texture and a Red-Yellow Oxisol (LVA) sandy-loam texture. The experimental design of the two soils was a randomized complete block in a split-plot, with three replications. In the plots, four rates of P (0, 30, 60 and 90 kg P₂O₅ ha⁻¹) in the form of triple superphosphate (TSP) were applied at sowing and, in the subplots, four rates of agricultural gypsum (0, 2, 4 and 6 t ha⁻¹), on the soil surface, before soybean sowing. In both soils, the immediate effects of treatments with P₂O₅ and gypsum in the soybean crop were evaluated. The effects of treatments on the succession of wheat (2014) – soybean (2014–15) were also evaluated in the clay Red Oxisol. In this case, in each crop (soybean and wheat), the same rates of P P₂O₅, in the form of TSP, were applied at the sowing, and the residual effect of the application of agricultural gypsum was evaluated. The experiments in greenhouse were carried out with wheat and soybean crops in undisturbed columns of soil. The PVC columns were taken from the Red Oxisol used in the field experiment. The experimental design used for each culture was in randomized blocks in a 3 × 2 factorial scheme, with four replications. The treatments were: control, agricultural gypsum and pure CaSO₄.2H₂O, without and with application of P₂O₅, in the form of TSP. The rate of agricultural gypsum and pure CaSO₄.2H₂O was corresponding to 6 t ha⁻¹ and the rate of P was 90 kg ha⁻¹ of P₂O₅. In all experiments, soil chemical attributes, plant attributes (nutrient extraction and dry mass production) and root attributes were evaluated. In the field experiments, nutritional diagnosis, nutrient exportation and grain yield of the crops were also evaluated. The P utilization efficiencies were calculated for wheat and soybean crops. In general, it was observed that, in the short term, gypsum did not influence P use efficiency (PUE) by soybean cultivated in RL and BL, but the residual effect of gypsum increased PUE by the rate of 5 t ha⁻¹, and also the PUE of the soybean, up to the rate of 4.3 t ha⁻¹. Adjusting the gypsum and P at sowing rates appropriately, it was possible to obtain high grain yields of wheat (above 4,5 t ha⁻¹) and soybean (above 4 t ha⁻¹) and provides economy of the phosphate fertilizer. However, it has been observed in all years that the highest rate of P at sowing (90 kg ha⁻¹ of P₂O₅) associated with the highest rate of agricultural gypsum (6 t ha⁻¹), in soils that had high levels of P, impaired root growth and wheat and soybean grain yields. In the experiments in greenhouse, it was verified that the application of pure CaSO₄.2H₂O and with 90 kg ha⁻¹ of P₂O₅ at the sowing promoted improvement in the root system and in the production of wheat dry mass, and did not interfere in the soybean crop. These results have shown that the use of gypsum can increase PUE and improve the productive performance of wheat and soybean plants. However, the use of high rates of P at sowing associated with high rates of agricultural gypsum should be carried out with caution, especially in soils that already have adequate levels of available P, so that crop performance do not be impaired.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill. *Triticum aestivum* (L.). Oxisol. Phosphorus. Phosphogypsum. Calcium sulphate. Subsoil acidity. Mineral nutrition.

LISTA DE FIGURAS

3 – EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA INFLUENCIADA PELA APLICAÇÃO DE GESSO NO DESEMPENHO DA SOJA CULTIVADA EM SOLOS COM DIFERENTES CLASSES TEXTURAIS.....	34
Figura 3.1 – Médias históricas de temperatura do ar e precipitação (16 anos) e as ocorridas durante a safra 2013–14 em Ponta Grossa, Paraná.....	39
Figura 3.2 – Comprimento radicular por área (cm cm^{-2}) de raízes de soja na profundidade de 0–60 cm, após a aplicação de fósforo ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) e gesso agrícola (6 t ha^{-1}) no Latossolo Vermelho argiloso (a) e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa (b). Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p=0,05$)..	63
Figura 3.3 – Produção de massa seca da parte aérea da soja após a aplicação de doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso (a) e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa (b). * $p<0.05$	73
Figura 3.4 – Rendimento de grãos de soja após a aplicação de doses de fósforo ($\triangle 0$, $\blacktriangle 30$, $\diamond 60$ e $\blacklozenge 90 \text{ kg ha}^{-1}$) e de gesso agrícola ($\circ 0$, $\bullet 2$, $\square 4$ e $\blacksquare 6 \text{ t ha}^{-1}$) no Latossolo Vermelho argiloso (a) e no Latossolo Vermelho-Amarelo, textura franco-arenosa (b). ** $p<0.01$ e * $p<0.05$	74
4 – EFEITO RESIDUAL DO GESSO AGRÍCOLA NA EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA A SUCESSÃO TRIGO–SOJA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	99
Figura 4.1 – Médias históricas de temperatura do ar e precipitação (16 anos) e as ocorridas desde a implantação do experimento, em outubro de 2013, até a safra (2014–15).....	104
Figura 4.2 – Comprimento total por área (cm cm^{-2}) de raízes de trigo (a) e de soja (b) na profundidade de 0–60 cm, após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola (6 t ha^{-1}), respectivamente. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p=0,05$)..	127
Figura 4.3 – Produção de massa seca de trigo (2014) (a) e soja (2014–15) (b) após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola, respectivamente.....	136

Figura 4.4 –	Rendimento de grãos de trigo (2014) (a) e soja (2014–15) (b) após a aplicação de fósforo ($\triangle$ 0, $\blacktriangle$ 30, $\diamond$ 60 e $\blacklozenge$ 90 kg ha ⁻¹) no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola ($\bigcirc$ 0, $\bullet$ 2, $\square$ 4 e $\blacksquare$ 6 t ha ⁻¹), respectivamente. **p<0.01 e *p<0.05.....	137
--------------	--	-----

5 – INFLUÊNCIA DO GESSO AGRÍCOLA NA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM PLANTAS DE TRIGO E SOJA.....	161
--	-----

Figura 5.1 –	Comprimento radicular por área (0–30 cm) de raízes de trigo (a) e soja (b) após a aplicação de fósforo (90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹) na semeadura e condicionadores em pré-semeadura. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).....	181
--------------	--	-----

Figura 5.2 –	Número de perfilhos por planta de trigo em colunas de solo, após aplicação de fósforo (90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹) na semeadura e condicionadores em pré-semeadura. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).....	186
--------------	---	-----

Figura 5.3 –	Produção de massa seca (g planta ⁻¹) da parte aérea de trigo (a) e soja (b), após aplicação de fósforo (90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹) na semeadura e condicionadores em pré-semeadura. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).....	187
--------------	--	-----

Figura 5.4 –	Eficiência do uso do fósforo (EUP) pelas plantas de trigo (a) e soja (b), afetados pela aplicação de gesso e de CaSO ₄ .2H ₂ O puro. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).....	189
--------------	---	-----

LISTA DE TABELAS

3 – EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA INFLUENCIADA PELA APLICAÇÃO DE GESSO NO DESEMPENHO DA SOJA CULTIVADA EM SOLOS COM DIFERENTES CLASSES TEXTURAIS.....	34
Tabela 3.1 – Resultados de análises químicas e granulométricas dos solos, antes da instalação dos experimentos.....	38
Tabela 3.2 – Alterações nos atributos químicos do solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação de doses de fósforo no Latossolo Vermelho textura argilosa.....	46
Tabela 3.3 – Alterações nos atributos químicos do solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação das doses de gesso agrícola no Latossolo Vermelho textura argilosa.....	48
Tabela 3.4 – Desdobramento da interação para o teor de Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e para a saturação por alumínio (m%) na camada 0–10 cm, após a aplicação das doses de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso.....	49
Tabela 3.5 – Alterações nos atributos químicos do solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação das doses de fósforo no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	51
Tabela 3.6 – Alterações nos atributos químicos do solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação das doses de gesso no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	52
Tabela 3.7 – Desdobramento da interação para o teor de Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e para a saturação por alumínio (m%) na camada 40–60 cm, após a aplicação das doses de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	53
Tabela 3.8 – Massa seca (mg dm^{-3}) de raízes de soja após a aplicação de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	55
Tabela 3.9 – Volume ($\text{mm}^3 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de soja após a aplicação de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	57
Tabela 3.10 – Área superficial ($\text{mm}^2 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de soja após a aplicação de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	59

Tabela 3.11 –	Diâmetro médio (mm) de raízes de soja após a aplicação de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	61
Tabela 3.12 –	Densidade de comprimento (m dm^{-3}) de raízes de soja após a aplicação de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa...	62
Tabela 3.13 –	Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes de soja e atributos químicos do solo em diferentes camadas amostradas no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	65
Tabela 3.14 –	Concentrações de nutrientes nas folhas de soja após a aplicação de doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	66
Tabela 3.15 –	Extração de nutrientes pela cultura da soja após a aplicação das doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	68
Tabela 3.16 –	Exportação de nutrientes pelos grãos de soja após a aplicação de doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	69
Tabela 3.17 –	Equações de regressão ajustadas para extração e exportação de nutrientes pela soja cultivada no Latossolo Vermelho argiloso (LV) e no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura franco arenosa, considerando a aplicação de doses de fósforo na semeadura.....	70
Tabela 3.18 –	Equações de regressão ajustadas para extração e exportação de nutrientes pela soja cultivada no Latossolo Vermelho argiloso (LV) e no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura franco arenosa, considerando a aplicação de doses de gesso.....	71
Tabela 3.19 –	Desdobramento da interação para a exportação de P nos grãos (kg ha^{-1}) de soja, após a aplicação das doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	72
Tabela 3.20 –	Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre o rendimento de grãos e a exportação de nutrientes pela soja cultivada no Latossolo Vermelho (LV) argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura franco-arenosa.....	75
Tabela 3.21 –	Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes e rendimento de grãos de soja em diferentes camadas do Latossolo Vermelho (LV) argiloso e do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura franco-arenosa.....	76

Tabela 3.22 –	Eficiências de aproveitamento de fósforo pela cultura da soja em função de doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.....	77
4 –	EFEITO RESIDUAL DO GESSO AGRÍCOLA NA EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA A SUCESSÃO TRIGO-SOJA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	99
Tabela 4.1 –	Resultados da análise química e granulométrica do solo, antes da instalação do experimento, em outubro de 2013.....	103
Tabela 4.2 –	Alterações nos atributos químicos de solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura do trigo (2014).....	111
Tabela 4.3 –	Alterações nos atributos químicos de solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após 12 meses da aplicação de gesso agrícola.....	112
Tabela 4.4 –	Desdobramento da interação para o teor de Al^{3+} ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura do trigo (2014) e 12 meses da aplicação de gesso agrícola.....	113
Tabela 4.5 –	Desdobramento da interação para a saturação por alumínio (m%), após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura do trigo (2014) e 12 meses da aplicação de gesso agrícola.....	114
Tabela 4.6 –	Desdobramento da interação para o Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura do trigo (2014) e 12 meses da aplicação de gesso agrícola.....	115
Tabela 4.7 –	Alterações nos atributos químicos de solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura da soja (2014–15).....	117
Tabela 4.8 –	Alterações nos atributos químicos de solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após 18 meses da aplicação de gesso agrícola.....	118
Tabela 4.9 –	Massa seca (mg dm^{-3}) de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) considerando a aplicação de fósforo no sulco de semeadura e a aplicação de gesso agrícola, após 12 e 18 meses, respectivamente.....	120
Tabela 4.10 –	Volume ($\text{mm}^3 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) considerando a aplicação de fósforo no sulco de semeadura e a aplicação de gesso agrícola, após 12 e 18 meses, respectivamente.....	121

Tabela 4.11 –	Área superficial ($\text{mm}^2 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) considerando a aplicação de fósforo no sulco de semeadura e a aplicação de gesso agrícola, após 12 e 18 meses, respectivamente.....	123
Tabela 4.12 –	Diâmetro médio (mm) de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) considerando a aplicação de fósforo no sulco de semeadura e a aplicação de gesso agrícola, após 12 e 18 meses, respectivamente.....	124
Tabela 4.13 –	Densidade de comprimento (m dm^{-3}) de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) considerando a aplicação de fósforo no sulco de semeadura e a aplicação de gesso agrícola, após 12 e 18 meses, respectivamente.....	126
Tabela 4.14 –	Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) e atributos químicos do solo em diferentes profundidades.....	128
Tabela 4.15 –	Concentrações de nutrientes nas folhas de trigo (2014) e soja (2014–15) após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola, respectivamente.....	130
Tabela 4.16 –	Extração de nutrientes pelas culturas de trigo (2014) e soja (2014–15) após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola, respectivamente.....	132
Tabela 4.17 –	Exportação de nutrientes pelos grãos de trigo (2014) e soja (2014–15) após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola, respectivamente.....	133
Tabela 4.18 –	Equações de regressão ajustadas para extração e exportação de nutrientes pelas culturas de trigo (2014) e soja (2014–15), considerando as doses de fósforo aplicadas na semeadura.....	134
Tabela 4.19 –	Equações de regressão ajustadas para extração e exportação de nutrientes pelas culturas de trigo (2014) e soja (2014–15), após 12 e 18 meses da aplicação das doses de gesso agrícola, respectivamente.	135
Tabela 4.20–	Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a exportação de nutrientes e o rendimento de grãos de trigo (2014) e soja (2014–15).	138
Tabela 4.21 –	Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes de trigo (2014) e soja (2014–15) e o rendimento de grãos em diferentes profundidades.....	139
Tabela 4.22 –	Eficiências de aproveitamento de fósforo pelo trigo (2014) e pela soja (2014–15) após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola, respectivamente.....	140

5 – INFLUÊNCIA DO GESSO AGRÍCOLA NA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM PLANTAS DE TRIGO E SOJA.....	161
Tabela 5.1 – Resultados das análises químicas do solo antes da coleta das colunas no campo.....	165
Tabela 5.2 – Atributos químicos do solo após aplicação de fósforo na semeadura de trigo em colunas de solo e da aplicação de condicionadores em pré-semeadura.....	169
Tabela 5.3 – Atributos químicos do solo após aplicação de fósforo na semeadura da soja em colunas de solo e da aplicação de condicionadores em pré-semeadura.....	171
Tabela 5.4 – Produção de massa seca de raízes (mg planta^{-1}) de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.....	173
Tabela 5.5 – Volume ($\text{mm}^3 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.....	175
Tabela 5.6 – Área superficial ($\text{mm}^2 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.....	177
Tabela 5.7 – Diâmetro médio (mm) de raízes de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.....	178
Tabela 5.8 – Densidade de comprimento (m dm^{-3}) de raízes de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.....	180
Tabela 5.9 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes de trigo e soja e atributos químicos de solo.....	182
Tabela 5.10 – Nutrientes acumulados nas raízes (0–30 cm) de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.....	183
Tabela 5.11 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os nutrientes acumulados nas raízes e o comprimento radicular por área e a massa seca de raízes de trigo e de soja.....	184
Tabela 5.12 – Extração de nutrientes pela parte aérea do trigo e da soja após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.....	185
Tabela 5.13 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a massa seca da parte aérea e a extração de nutrientes pelas plantas de trigo e soja.....	188

Tabela 5.14 –	Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes de trigo e soja e a produção de massa seca da parte aérea.....	188
---------------	--	-----

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	20
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Características dos solos sob sistema plantio direto no Brasil.....	23
2.2 Gesso agrícola no solo e respostas das culturas.....	23
2.3 Fósforo no solo.....	25
2.4 Adubação fosfatada e resposta das culturas.....	27
2.5 Uso associado de fósforo e gesso agrícola.....	28
2.6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	30
3 – EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA INFLUENCIADA PELA APLICAÇÃO DE GESSO NO DESEMPENHO DA SOJA CULTIVADA EM SOLOS COM DIFERENTES CLASSES TEXTURAIS.....	34
3.1 RESUMO.....	34
3.2 ABSTRACT.....	35
3.3 INTRODUÇÃO.....	36
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.4.1 Localização e caracterização das áreas experimentais.....	38
3.4.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	39
3.4.3 Cultura da soja.....	40
3.4.4 Avaliações.....	41
3.4.5 Efeitos da aplicação de gesso na eficiência da adubação fosfatada.....	42
3.4.6 Análises estatísticas.....	43
3.5 RESULTADOS.....	45
3.5.1 Alterações nos atributos químicos dos solos após a colheita da soja.....	45
3.5.2 Alterações nos atributos radiculares.....	54
3.5.3 Diagnose nutricional da soja.....	65
3.5.4 Extração e exportação de nutrientes pela soja.....	67
3.5.5 Produção de massa seca e rendimento de grãos de soja.....	73
3.5.6 Eficiências de aproveitamento do fósforo pela soja.....	76

3.6 DISCUSSÃO.....	79
3.6.1 Alterações nos solos com a adubação fosfatada.....	79
3.6.2 Alterações nos solos com a aplicação de gesso agrícola.....	80
3.6.3 Alterações nos solos ocasionadas pela interação entre fósforo e gesso.....	82
3.6.4 Alterações nos atributos radiculares da soja.....	83
3.6.5 Alterações nos atributos das plantas de soja.....	86
3.6.6 Produtividade e eficiência de aproveitamento de fósforo pela soja.....	88
3.7 CONCLUSÕES.....	91
3.8 REFERÊNCIAS.....	92

4 – EFEITO RESIDUAL DO GESSO AGRÍCOLA NA EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA A SUCESSÃO TRIGO–SOJA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	99
4.1 RESUMO.....	99
4.2 ABSTRACT.....	100
4.3 INTRODUÇÃO.....	101
4.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	103
4.4.1 Localização e caracterização da área experimental.....	103
4.4.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	104
4.4.3 Sucessão de culturas.....	105
4.4.4 Avaliações.....	106
4.4.5 Efeitos do residual de gesso na eficiência da adubação fosfatada.....	107
4.4.6 Análises estatísticas.....	108
4.5 RESULTADOS.....	110
4.5.1 Alterações nos atributos químicos do solo.....	110
4.5.2 Alterações nos atributos radiculares do trigo (2014) e da soja (2014–15).....	119
4.5.3 Diagnose nutricional do trigo (2014) e da soja (2014–15).....	129
4.5.4 Extração e exportação de nutrientes pelo trigo (2014) e pela soja (2014–15).....	131
4.5.5 Produção de massa seca e rendimento de grãos de trigo (2014) e soja (2014–15).....	136
4.5.6 Eficiências de aproveitamento de fósforo pelo trigo (2014) e pela soja (2014–15).....	139
4.6 DISCUSSÃO.....	141
4.6.1 Efeitos da aplicação do fósforo na semeadura do trigo (2014) e da soja (2014–	

15).....	141
4.6.2 Efeito residual do gesso no solo após 12 e 18 meses da aplicação.....	142
4.6.3 Efeito da interação entre fósforo e gesso.....	144
4.6.4 Alterações nos atributos radiculares do trigo (2014) e da soja (2014–15).....	145
4.6.5 Alterações nos atributos das plantas de trigo (2014) e de soja (2014–15).....	147
4.6.6 Produtividade e eficiência do uso de fósforo pelas culturas do trigo (2014) e da soja (2014–15).....	149
4.7 CONCLUSÕES.....	153
4.8 REFERÊNCIAS.....	154

5 – INFLUÊNCIA DO GESSO AGRÍCOLA NA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM PLANTAS DE TRIGO E SOJA.....	161
5.1 RESUMO.....	161
5.2 ABSTRACT.....	162
5.3 INTRODUÇÃO.....	163
5.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	165
5.4.1 Localização e caracterização experimental.....	165
5.4.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	166
5.4.3 Condução dos experimentos.....	166
5.4.4 Avaliações.....	166
5.4.5 Análises estatísticas.....	167
5.5 RESULTADOS.....	168
5.5.1 Alterações nos atributos químicos dos solos.....	168
5.5.2 Atributos radiculares do trigo e da soja.....	172
5.5.3 Acúmulo de nutrientes nas raízes de trigo e soja.....	182
5.5.4 Extração de nutrientes pela parte aérea do trigo e da soja.....	184
5.5.5 Número de perfilhos por planta de trigo.....	185
5.5.6 Produção de massa seca da parte aérea de trigo e soja.....	186
5.5.7 Eficiência do uso do fósforo pelo trigo e pela soja.....	188
5.6 DISCUSSÃO.....	190
5.6.1 Alterações nos atributos químicos dos solos.....	190
5.6.2 Alterações nas raízes.....	191
5.6.3 Alterações na parte aérea do trigo e da soja.....	194

5.7 CONCLUSÕES.....	195
5.8 REFERÊNCIAS.....	196
6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	201

1 – INTRODUÇÃO

Alternativas econômicas visando a melhoria na qualidade do solo vêm sendo direcionadas no sentido de aprimorar a eficiência de utilização de nutrientes pelas plantas, aumentar o rendimento de grãos, evitar a degradação dos recursos ambientais e maximizar a lucratividade nos sistemas de produção agrícola. Desde o início da década de 1970, o sistema plantio direto tem se destacado como uma das estratégias mais eficazes para melhorar a sustentabilidade dos sistemas de produção no Brasil (FEBRAPDP, 2015).

A atividade agrícola brasileira encontra-se, na maioria das vezes, sobre solos altamente intemperizados, caracterizados por elevada acidez, alta concentração de alumínio (Al) trocável, baixos teores de bases trocáveis e de fósforo (P) disponível (RAIJ, 2011; SANTOS et al., 2008). Em solos sob sistema plantio direto, a correção da acidez é realizada por meio da aplicação de calcário na superfície, sem incorporação (CAIRES et al., 2000). Porém, neste caso, a ação da calagem pode ficar restrita às camadas superficiais, devido à baixa mobilidade dos produtos da reação do calcário no solo (CAIRES et al., 2006; MORAES et al., 2007).

A melhoria do ambiente radicular em camadas subsuperficiais por meio da aplicação do gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tem sido fator importante para o aumento do rendimento das culturas (CAIRES et al., 2011a,b; RAMPIM et al., 2011; ZANDONÁ et al., 2015). Quando aplicado na superfície, o gesso movimenta-se para as camadas do subsolo e, como resultado, tem-se o aumento de cálcio (Ca) e redução da toxicidade de Al em camadas subsuperficiais, favorecendo a capacidade das raízes em explorar água e nutrientes (CAIRES et al., 1999, 2003; RAMPIM & LANA, 2015; SUMNER et al., 1986).

O P é o nutriente mais limitante da produtividade agrícola no Brasil (NOVAIS & SMYTH, 1999), devido à baixa reserva natural deste nutriente no solo e à favorável adsorção dos íons fosfatos nas superfícies dos óxidos de ferro (Fe) e Al (BROGGI et al., 2010). Por esse motivo, os adubos fosfatados têm sido utilizados em maiores quantidades no sistema. Embora exigido pelas plantas em menores quantidades que o nitrogênio (N) e o potássio (K), o P é um elemento essencial e insubstituível, representando extrema importância para o desenvolvimento do sistema radicular (FAGERIA & MOREIRA, 2011; MALAVOLTA, 2006).

Dentre as várias fontes minerais e orgânicas de P disponíveis para o uso na agricultura, os superfosfatos são as fontes fosfatadas mais utilizadas no mundo, representando, entretanto, alto custo ao agricultor (SANTOS et al., 2008). O constante aumento dos preços destes fertilizantes e a possibilidade de esgotamento (ainda neste século) de reservas minerais de rochas fosfáticas (matéria-prima para a fabricação de fertilizantes fosfatados) têm despertado

a necessidade de realização de pesquisas mundiais no sentido de aprimorar a eficiência do uso de P na agricultura (CORDELL et al., 2009; SCHOLZ et al., 2013).

Incrementos de P no solo podem ser obtidos com aplicações de doses elevadas de gesso agrícola (CAIRES et al., 2003; 2011b). O gesso apresenta em sua composição cerca de 6,0 a 7,5 g kg⁻¹ de P₂O₅ (VITTI et al., 2008), cuja impureza pode ter reflexos importantes na melhoria da nutrição das plantas (SUMNER et al., 1986). Caires et al. (2003) observam que o aumento de P na camada superficial do solo (0–5 cm) com a aplicação do gesso agrícola em um Latossolo Vermelho sob plantio direto proporcionou aumento na concentração deste nutriente nas folhas de soja. Em Argissolo Vermelho, Caires et al. (2011b) também relataram aumento de P na camada 0–10 cm com a aplicação de gesso, com incremento do nutriente em folhas de milho e soja. Porém, os efeitos da aplicação de gesso no solo podem variar de acordo com a textura do solo, as condições climáticas, a reação e o manejo do solo. Além disso, a capacidade de adsorção de P é maior em solos de textura argilosa, quando comparada a solos de textura arenosa (MACHADO et al., 2011). Isto demonstra a importância em se conhecer as características do solo para a determinação do uso de insumos agrícolas de forma adequada em cada sistema.

Apesar de os benefícios da utilização de gesso agrícola e da adubação fosfatada serem bem conhecidos na literatura, são escassas as informações sobre o efeito combinado destes insumos nos atributos de fertilidade do solo, nas características nutricionais e no rendimento de grãos das culturas de soja e trigo em sistema plantio direto.

Considerando a hipótese de que a eficiência da adubação fosfatada é aumentada com o uso de gesso agrícola em sistema plantio direto, o presente trabalho foi realizado com os objetivos de: (i) avaliar os efeitos imediatos da aplicação de gesso na eficiência da adubação fosfatada para a cultura da soja cultivada em solos com diferentes texturas; (ii) avaliar a eficiência da adubação fosfatada para a sucessão trigo-soja, após 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola em solo argiloso sob sistema plantio direto; e (iii) avaliar, em casa de vegetação, a influência da aplicação de gesso na eficiência da adubação fosfatada de plantas de trigo e soja, utilizando-se, além do gesso agrícola, o sulfato de cálcio (CaSO₄.2H₂O) puro, com intuito de eliminar a interferência do resíduo de P proveniente do gesso agrícola. Para isso, o assunto da tese foi dividido em três capítulos (Capítulos 3, 4 e 5): Capítulo 3 – Eficiência da adubação fosfatada influenciada pela aplicação de gesso agrícola no desempenho da soja cultivada em solos com diferentes classes texturais; Capítulo 4 – Efeito residual do gesso agrícola na eficiência da adubação fosfatada para a sucessão trigo-soja em

sistema plantio direto; e Capítulo 5 – Influência do gesso na eficiência da adubação fosfatada em plantas de trigo e soja.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Características dos solos sob sistema plantio direto no Brasil

O sistema plantio direto, estabelecido no Brasil a partir da década de 1970, garantiu maior sustentabilidade para a agricultura em áreas ameaçadas por processos erosivos. Esta técnica de manejo fundamenta-se na ausência de revolvimento do solo, na sua cobertura permanente e na rotação de culturas (CASÃO JUNIOR et al., 2012).

Em regiões tropicais e subtropicais, os solos normalmente são ácidos e apresentam, em condições naturais, altas concentrações de Al e manganês (Mn) na solução (RAIJ, 2011). Os solos, nessas regiões, também possuem baixas concentrações de Ca, magnésio (Mg) e K trocáveis, além de baixos teores de P disponível, como consequência do acentuado processo de intemperização (SANTOS et al., 2008). Além disso, o próprio cultivo tende a acentuar esse problema, devido à exportação de cátions nas colheitas e, principalmente, à aplicação de fertilizantes nitrogenados amoniacais. Dessa forma, a alta acidez natural dos solos e à baixa disponibilidade de nutrientes (principalmente P), têm sido os fatores que mais limitam a produção agrícola nas regiões tropicais e subtropicais (NOVAIS & SMYTH, 1999). Elevadas concentrações de Al^{3+} e insuficiência de P na solução dificultam o crescimento radicular, diminuindo a absorção de água e nutrientes pelas plantas (ABICHEQUER et al., 2003; FAGERIA & MOREIRA, 2011).

A correção da acidez do solo no sistema plantio direto é feita por meio de aplicação de calcário na superfície sem incorporação, cujo efeito fica, normalmente, restrito às camadas superficiais do solo (CAIRES et al., 2000; 2006). No entanto, a melhoria nas condições químicas do subsolo tem sido fator de suma importância para o adequado desenvolvimento do sistema radicular, aumentando a capacidade das plantas em explorar água e nutrientes (RAMPIM & LANA, 2015).

2.2 Gesso agrícola no solo e respostas das culturas

Várias pesquisas com o uso do gesso agrícola foram desenvolvidas no mundo a partir da década de 1980, tendo-se verificado que esse subproduto pode ser promissor em variadas condições de solo e clima, ocasionando melhoria nos atributos químicos do solo,

na nutrição mineral das plantas e na produtividade das culturas (CAIRES et al., 2003; 2011a,b; RAMPIM et al., 2011; 2015; SUMNER et al., 1986).

O gesso agrícola ou fosfogesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um subproduto, na forma de pó, obtido durante o processo de produção de ácido fosfórico, utilizado para a fabricação de fertilizantes fosfatados. O processo de obtenção do ácido fosfórico baseia-se na ação de um ácido, geralmente o sulfúrico, sobre a rocha fosfática, finamente moída, previamente purificada e concentrada (VITTI et al., 2008). Assim, a cada tonelada de P_2O_5 na forma de ácido fosfórico (H_3PO_4) produzido obtêm-se de 4,0 a 5,0 t de gesso e, na produção uma tonelada de H_3PO_4 , são obtidas aproximadamente 5,5 t de gesso. O gesso agrícola, excluindo-se a água, contém cerca de 950 g kg^{-1} de sulfato de Ca diidratado (MALAVOLTA et al., 1992). Além disso, o gesso agrícola contém de 6,0 a $7,5 \text{ g kg}^{-1}$ de P_2O_5 (VITTI et al., 2008) como impureza em sua composição, sendo este valor considerado expressivo para a nutrição de P das plantas, quando o produto é utilizado em doses elevadas (CAIRES et al., 2003; 2011; RAMPIM et al., 2013).

Diversos autores têm demonstrado melhoria nas condições de fertilidade do solo com a aplicação de gesso, por meio de aumento nos teores de Ca e S-SO_4^{2-} , e redução na toxicidade do Al^{3+} , em camadas subsuperficiais (CAIRES et al., 2001; 2002; 2003; 2006; 2011a; RAMPIM et al., 2011; 2015; ZANDONÁ et al., 2015). Além disso, aumentos nos teores de P na camada superficial do solo, nas folhas e nos grãos de soja também têm sido observados com a aplicação de altas doses de gesso em sistema plantio direto (CAIRES et al., 2003; 2006; 2011b).

O íon sulfato (S-SO_4^{2-}), dependendo das propriedades do solo, pode se comportar de diferentes maneiras. Em solos com predominância de cargas elétricas negativas, o S-SO_4^{2-} é pouco retido, sendo facilmente lixiviado. Em solos com altos teores de óxidos hidratados de Fe e Al, o sulfato pode ser adsorvido ao solo por troca iônica ou pelo processo de troca de ligantes (RAIJ, 2011). Além disso, a quantidade de enxofre (S) no solo é diretamente proporcional aos teores de argila, óxidos e matéria orgânica, sendo também influenciada pelo pH do solo. Solos com baixos teores de matéria orgânica e de argila são os que têm apresentado as maiores probabilidades de resposta à aplicação de S (TIECHER et al., 2012).

O gesso agrícola, além de ocasionar melhoria nas condições químicas do subsolo, é uma excelente fonte de Ca e de S para as plantas. Desde o trabalho de Ritchey et al. (1980), têm sido observadas na literatura respostas diferenciadas das culturas à aplicação de gesso no solo. A cultura do milho tem apresentado alta frequência de aumentos na produção de grãos em

resposta à aplicação de gesso (CAIRES et al., 1999; 2011a,b; 2016). Cereais de inverno, como o trigo e a cevada, também têm demonstrado ser responsivas à aplicação de gesso (CAIRES et al., 2001; 2002; MATULA & PECHOVÁ, 2007; RAMPIM et al., 2011; MICHALOVICZ et al., 2014). As culturas leguminosas (Família Fabaceae), apesar de absorverem grandes quantidades de S para a produção de proteínas, têm demonstrado estudos mais controversos quanto à resposta à adição de gesso. Caires et al. (2001; 2003; 2006; 2011a,b) e Rampim et al. (2011) não observaram alterações na produção de grãos de soja com a aplicação de gesso, porém, observou-se que a adição de gesso proporcionou melhoria na qualidade do produto (CAIRES et al., 2006; RAMPIM et al., 2015). Por outro lado, em condições de limitada disponibilidade de água, Zandoná et al. (2015) relataram que o gesso incrementou a produtividade de grãos de soja, com respostas positivas até a dose de $2,0 \text{ t ha}^{-1}$, enquanto Pauletti et al. (2014) observaram respostas positivas da soja com doses até $6,0 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso. Desta forma, pode-se perceber que ainda há dúvidas a respeito das condições em que se podem esperar efeitos favoráveis do gesso nas produções das culturas e quanto à recomendação do produto.

Atualmente, os critérios de recomendação de gesso baseiam-se nos teores de Ca e Al trocáveis e também na concentração de argila presente nas camadas abaixo de 20 cm do solo. No caso de solos arenosos de baixa fertilidade e com baixos teores de matéria orgânica, doses de gesso acima de $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ podem causar efeitos negativos em culturas devido à remoção preferencial de Mg^{2+} da camada superior do perfil (ALCORDO & RECHCIGL, 1993). De acordo com Caires et al. (2011b); Rampim & Lana (2015) e Zambrosi et al. (2007), a remoção preferencial do Mg^{2+} com o uso de gesso é facilitada pela energia de ligação de cátions com as partículas de solo, à preferência pela formação de íons pareados com o sulfato (MgSO_4^0) e à relação quantidade/intensidade de cada nutriente no solo.

2.3 Fósforo no solo

Devido à baixa disponibilidade do P em solos tropicais, este é o nutriente que mais limita a produção de culturas no Brasil, sendo também o nutriente utilizado em maiores quantidades na adubação (SANTOS et al., 2008). Apesar de o suprimento natural de P ser insatisfatório ao adequado crescimento das plantas, seu teor total no solo na camada de 0–20 cm, pode variar de 100 a 4.400 kg ha^{-1} , dependendo do material de origem, do processo de gênese e das condições climáticas (RAIJ, 2011). Todavia, qualquer que seja a natureza do solo, a concentração de P na solução é extremamente baixa, normalmente entre 0,1 e 1,0%, dada

a forte interação desse nutriente com o solo, tanto por precipitação com compostos de Al, Fe e Ca, quanto por adsorção específica (BROGGI et al., 2010; NOVAIS & SMYTH, 1999). Na solução, o P encontra-se na forma predominante de íons ortofosfatos (HPO_4^{2-} e H_2PO_4^-). Em decorrência das reações de equilíbrio no solo, a forma H_2PO_4^- predomina em solos ácidos, ou seja, na faixa de pH (água) de 5,0 a 6,0, e a forma HPO_4^{2-} passa a ser predominante em situações de pH mais elevado (acima de 6,0) (RAIJ, 2011).

Na fase sólida do solo, o P pode encontrar-se: (i) complexado com íons de Fe e Al em solos ácidos ou com íons de Ca em solos alcalinos, podendo estar em rápido equilíbrio com a solução (P lábil); (ii) complexado na matéria orgânica por diferentes labilidades (P orgânico); e (iii) com o passar do tempo, o fosfato adsorvido a óxidos de Fe e Al e minerais de argila, em condições de elevada acidez, pode ser recoberto e tornar-se parte de um óxido cristalino (P não lábil) (NOVAIS & SMYTH, 1999; VILAR & VILAR, 2013).

A matéria orgânica (MO) pode ser considerada uma fonte potencial de P às plantas por causa da ciclagem biológica, em que microrganismos e raízes podem mineralizar o P orgânico por meio da síntese e exsudação de fosfatases (ROSS et al., 1995). Vários compostos de P foram identificados na matéria orgânica do solo, predominando os fosfatos de inositol, fosfolipídeos e ácido nucléicos (SANTOS et al., 2008). Porém, a variação entre solos é muito grande, podendo o P orgânico representar apenas 4,0% do P total em solos com teor de matéria orgânica muito baixo, enquanto que, em solos orgânicos, pode constituir aproximadamente 90% do P total (ANGHINONI & BISSANI, 2004).

Os solos também diferem quanto à sensibilidade do P lábil a alterações do P da solução. Essa resistência é denominada poder tampão ou fator capacidade (FC) de P do solo. Solos com maior poder tampão, como os mais intemperizados e argilosos, mantêm mais constantes os teores de P da solução quando submetidos à retirada de P (NOVAIS & SMYTH, 1999). Assim, o P lábil atua tamponando o sistema, procurando controlar os excessos e as carências, dentro dos limites de cada solo.

Solos argilosos, compostos predominantemente por óxidos de Fe e de Al e caulinita, apresentam alta capacidade de adsorção de P (BROGGI et al., 2010; MACHADO et al., 2011). O P adicionado é rapidamente adsorvido pelo solo, principalmente quando cultivado no sistema convencional de preparo, uma vez que há maior exposição a novos sítios de adsorção decorrente do revolvimento do solo, exigindo maiores doses de P para manter a mesma concentração na solução do solo (RHEINHEIMER & ANGHINONI, 2001). Assim, mesmo quando os teores de P no solo forem relativamente elevados, apenas uma pequena

fração com baixa energia de ligação possibilita sua dessorção e, por conseguinte, sua disponibilidade às plantas (MARCOLAN, 2006).

A maior limitação do P, desde o fluxo inicial na fase sólida até sua utilização pelas plantas, está relacionada com a sua baixa mobilidade no solo, podendo não atingir a superfície radicular no período de crescimento das culturas, mesmo que não haja deficiência de disponibilidade de água (COSTA et al., 2009). O fluxo de P e a absorção pelas raízes das plantas são alterados por modificações na rizosfera, provocadas pelas próprias raízes, devido à absorção seletiva de íons e de água, e a liberação de exsudatos (RHEINHEIMER et al., 2003). A morfologia e a distribuição das raízes são alteradas pelo modo de aplicação do P no solo (localizado ou não), havendo maior estímulo ao seu crescimento nas regiões fertilizadas, especialmente em solos com alta capacidade de retenção de P e baixo teor de P disponível (COSTA et al., 2009; FAGERIA, 2013).

Solos mais argilosos possuem maior quantidade de P na fase sólida que os mais arenosos, para uma mesma concentração na solução. No entanto, com a aplicação de doses crescentes de P no solo, verifica-se que, após o equilíbrio, o poder tampão diminui porque, proporcionalmente, maior quantidade de P permanece na solução. Solos arenosos tendem a ter mais P em solução para uma mesma dose de P aplicada, em relação aos solos argilosos (MACHADO et al., 2011; MARCOLAN, 2006). Desta forma, com a menor adsorção de P em solos arenosos, a difusão tende a ser mais facilitada, quando comparada com solos argilosos.

2.4 Adubação fosfatada e resposta das culturas

Dentre as várias fontes minerais e orgânicas de P disponíveis para o uso na agricultura, os superfosfatos com alta solubilidade em água são as fontes de P mais utilizadas no mundo para a correção dos baixos teores de P no solo (SANTOS et al., 2008). Um benefício desses fertilizantes fosfatados é a facilidade de aplicação localizada por se tratar de produtos granulados. Entretanto, em solos ácidos e muito intemperizados, uma parte do P aplicado na forma de superfosfato triplo (SFT) pode tornar-se imediatamente indisponível pelos processos de adsorção nas superfícies de óxidos de Fe e Al e minerais de argila e/ou precipitação como minerais secundários de P ligado a Fe e Al (BROGGI et al., 2010). No sistema convencional de preparo do solo, as fertilizações são baseadas nas concentrações de P disponível no solo e nas necessidades das culturas a serem imediatamente implantadas. Porém, no sistema plantio direto, a aplicação de fertilizantes leva em consideração não apenas uma cultura isoladamente, mas também a sucessão de culturas no sistema.

Em situação de deficiência do P, o crescimento vegetal da parte aérea é afetado, pois as raízes se transformam em drenos de carboidratos para aumentar sua massa e estas se expandem (FAGERIA & MOREIRA, 2011; MALAVOLTA, 2006). Como os solos brasileiros são limitantes em P, as plantas absorvem este nutriente contra um elevado gradiente de concentração (NOVAIS & SMYTH, 1999), sendo este mecanismo vital para o desenvolvimento e o crescimento. O P é encontrado em vários processos metabólicos nos vegetais, como na fotossíntese, respiração, transferências de genes e processos que envolvem transferência de energia. Participa da síntese de macromoléculas e da absorção ativa de nutrientes. Apresenta importância destacada devido à sua interação com outros elementos, afetando a sua disponibilidade no solo e a nutrição vegetal (BLEVINS, 1999; MALAVOLTA, 2006; SANTOS et al., 2008; VILAR & VILAR, 2013). Desta forma, respostas expressivas de culturas como soja, milho e trigo, à aplicação de P têm sido observadas, resultando em maiores rendimentos de grãos com a utilização de fontes de maior solubilidade (CORRÊA et al., 2004; HARGER et al., 2007; PRADO et al., 2001).

2.5 Uso associado de fósforo e gesso agrícola

A principal fonte natural de P utilizada para a fabricação de fertilizantes fosfatados é a rocha fosfática, também conhecida como fosfato natural. Em geral, há dois tipos de rochas: as sedimentares e as ígneas. No mundo, cerca de 80% da rocha fosfática utilizada para a fabricação de fertilizantes fosfatados provém de depósitos sedimentares (STEWART et al., 2005).

As reservas mundiais de rocha fosfática vêm diminuindo e isso tem sido motivo de preocupação porque elas deverão se esgotar no futuro. Em 2002, o United States Geological Survey (USGS) estimou as reservas mundiais de rocha fosfatada em 12.990 milhões de toneladas (STEWART et al., 2005). De acordo com Fixen (2009), considerando a capacidade atual de produção de fertilizantes fosfatados, tais reservas poderiam representar uma longevidade de 696 anos. Porém, diversos são os relatos que consideram as reservas fosfatadas como limitantes ainda neste século (CORDELL et al., 2009; DOWSON & HILTON, 2011; SCHOLZ et al., 2013). Ao mesmo tempo, os fertilizantes fosfatados vêm contabilizando preços cada vez mais elevados.

O emprego de gesso associado com fertilizantes fosfatados, além de contribuir para o fornecimento de P (a custos mais reduzidos), pode favorecer o desenvolvimento do sistema radicular e aumentar a eficiência de uso de P pelas plantas. Ressalta-se a importância que tanto

o gesso agrícola como o P representa para o crescimento do sistema radicular, ampliando a área de exploração das raízes no solo e, conseqüentemente, a eficiência de absorção de água e nutrientes pelas plantas (FAGERIA, 2013; FAGERIA & MOREIRA, 2011). Outro benefício do gesso associado ao fertilizante fosfatado seria o aumento da disponibilidade de P na solução do solo. Caires et al. (2011b), avaliando os efeitos do gesso nas características químicas do solo, constatou que a adição de gesso agrícola proporcionou maiores teores de P disponível na camada de 0–10 cm. Rampim et al. (2013) observaram aumento do P em camadas de solo até 20–40 cm, devido à aplicação de 5,0 t ha⁻¹ de gesso agrícola em Latossolo Vermelho.

O sucesso do sistema plantio direto depende de vários fatores que interagem entre si. Dessa forma, é importante conhecer os efeitos da aplicação de gesso agrícola combinada com a adubação fosfatada em diferentes tipos de solo para a fundamentação de estratégias que proporcionem maior disponibilidade de P e economicidade destes insumos para o sistema.

2.6 REFERÊNCIAS

- ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H.; ANGHINONI, I. Absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo submetidas à toxidez de alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.373-378, 2003.
- ALCORDO, I. S.; RECHCIGL, J. E. Phosphogypsum in agriculture: a review. **Advances in Agronomy**, v. 118, p. 49-55, 1993.
- ANGHINONI, I.; BISSANI, C.A. Fósforo e adubos fosfatados. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.; J.; CAMARGO, F.O.A. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênese, p.117-138, 2004.
- BLEVINS, D. G. Why plants need phosphorus. **Better Crops**, v.83, p.29-30, 1999.
- BROGGI, F.; OLIVEIRA, A. L. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G.; NASCIMENTO, C. W. A. Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation time. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.32-38, 2010.
- CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.161-169, 2000.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J; KUSMAN, M. T. Alterações químicas no solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.275-286, 2003.
- CAIRES, E. F.; CORRÊA, J. C. L.; CHURKA, S.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. **Scientia Agricola**, v.63, p.502-509, 2006.
- CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W. A; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, 315-327, 1999.
- CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v.27, p.45-53, 2011a.
- CAIRES, E. F.; MASCHIETTO, E. H. G.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; JORIS, H. A. W. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agricola**, v.68, p.209-216, 2011b.
- CAIRES, E. F.; ZARDO FILHO, R.; BARTH, G.; JORIS, H. A. W. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO₃-N in Subsoil. **Pedosphere**, v.26, p.474-485, 2016.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; LLANILLO, R. F. **Plantio direto no Sul do Brasil: Fatores que facilitaram a evolução do sistema e o desenvolvimento da mecanização conservacionista**. Londrina: IAPAR, 2012. 77p.

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.1231-1237, 2004.

COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; CAO, E.G. & HOLZSCHUH, M.J. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1237-1247, 2009.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v.19, p.292-305, 2009.

DOWSON, C. J.; HILTON, J. Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. **Food Policy**, v.36, p.514-522, 2011.

FAGERIA, N. K. **The role of plant roots in crop production**. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2013. 451p.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plantas. **Advances in Agronomy**, v.110, p.251-331, 2011.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO E IRRIGAÇÃO – FEBRAPDP. **Plantio direto: A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira**. Foz do Iguaçu: Parque Itaipu, 2015. 144p. Disponível em: <http://febrapdp.org.br/download/publicacoes/LIVRO_PLANTIO_DIRETO_WEB.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2016.

FIXEN, P. E. **Reservas mundiais de nutrientes e fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2009. 14p.

HARGER, N.; BRITO, O.R.; RALISCH, R.; ORTIZ, F.R.; WATANABE, T.S. Avaliação de fontes e doses de fósforo no crescimento inicial do milho. **Semina: Ciências Agrárias**, v.28, p.39-44, 2007.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H.; ANDRADE, B. .B.; LANA, R. M. Q ; KORNDORFER, G. H . Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Bioscience Journal**, v.27, p.70-76, 2011.

MARCOLAN, A.L. **Suprimento e absorção de fósforo em solos submetidos a diferentes sistemas de preparo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Tese de Doutorado), 2006. 107p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 631p.

MALAVOLTA, E. O gesso agrícola no ambiente e na nutrição da planta - perguntas e respostas. In: II SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA. **Anais...** Uberaba, p.41-66, 1992.

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

MICHALOVICZ, L.; MÜLLER, M.M.L.; FOLONI, J.S.S., KAWAKAMI, J.; NASCIMENTO, R.; KRAMER, L.F.M. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1496–1505, 2014.

MORAES, M. F.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; COSCIONE, A. R. Mobilidade de íons em solo ácido com aplicação de calcário, ácido orgânico e material vegetal em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.673-684, 2007.

MOTTA, L. R.; BORGES, B. M. M. N.; FLORES, R. A.; SANTOS, C. L. R.; PRADO, R. M.; SOUSA, J. I. Gessagem na cultura da soja no sistema de plantio direto com e sem adubação potássica. **Revista Agroambiente**, v.7, p.129-135, 2013.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.495-505, 2014.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; ROQUE, C.G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.83-90, 2001.

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

RAMPIM, L.; BORSOI, A.; MOLIN, P. V. D.; SARTO, M. V. M.; ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; LIMA, P. R.; GUIMARÃES, V. F.; OHLAND, T.; KLEIN, J. Foliar tissue, grain yield and economic return by surface application of gypsum and diferente number of soybean plants in precision seed drill. **African Journal of Agricultural Research**, 10, 1636-1646, 2015.

RAMPIM, L.; LANA, M. C. Ion mobility and base saturation after gypsum application in continuous soybean-wheat cropping system under no-till. **Australian Journal of Crop Science**, v.9, p.468-476, 2015.

RAMPIM, L.; LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em Latossolo Vermelho submetido ao gesso cultivado com trigo e soja. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, p.1623-1638, 2013.

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

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.41-49, 2003.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.151-160, 2001.

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

ROSS, D. J.; SPEIR, T. W.; KETTLES, H. A.; MACKAY, A. D. Soil microbial biomass, C and N mineralization and enzyme activities in a hill pasture: Influence of season and slow-release P and sorption fertilizer. **Soil Biology and Biochemistry**, v.27, p.1431-1443, 1995.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, p.576-586, 2008.

SCHOLZ, R. W.; ULRICH, A. E.; EILITTA, M.; ROY, A. Sustainable use of phosphorus: A finite resource. **Science of The Total Environment**, v.461, p.799-803, 2013.

STEWART, W. M.; HAMMOND, L. L.; van KAUWENBERGH, S. J. Phosphorus as a natural resource. In: STEWART, W. M.; HAMMOND, L. L.; van KAUWENBERGH, S. J. (Eds.). **Phosphorus: agriculture and the environment**. Madison: ASA-CSSA-SSSS, 2005. p.3-21.

SUMNER, M. E.; SHAHANDEH, H.; BOUTON, J.; HAMMEL, J. Amelioration of an acid soil prolife through deep liming an surface application of gypsum. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1254-1278, 1986.

TIECHER, T.; SANTOS, D. R.; RASCHE, J. W. A.; BRUNETTO, G.; MALLMANN, F. J. K.; PICCIN, R. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada. **Bragantia**, v.71, p.518-527, 2012.

VILAR, C. C.; VILAR, C. M. Comportamento do fósforo em solo e planta. **Revista Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v.8, p.37-44, 2013.

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

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid Oxisol under no-till system. **Nutrient Cycling in Agroecosystem**, v.79, p.169-179, 2007.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.45, p.128-137, 2015.

3 – EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA INFLUENCIADA PELA APLICAÇÃO DE GESSO AGRÍCOLA NO DESEMPENHO DA SOJA CULTIVADA EM SOLOS COM DIFERENTES CLASSES TEXTURAIS

3.1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da adubação fosfatada influenciada pela aplicação de gesso agrícola no desempenho da soja cultivada em solos com diferentes classes texturais. Os experimentos foram instalados em dois Latossolos (Latosso Vermelho – LV, textura argilosa e Latosso Vermelho-Amarelo – LVA, textura franco-arenosa) localizados no município de Ponta Grossa, Paraná, Brasil. O delineamento experimental empregado, nos dois solos, foi o de blocos completos ao acaso em parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas foram aplicadas quatro doses de P (0, 30, 60 e 90 kg P₂O₅ ha⁻¹), na forma de superfosfato triplo, no sulco de semeadura e, nas subparcelas, foram empregadas quatro doses de gesso agrícola (0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹), a lançar sobre a superfície do solo, antes da semeadura. As avaliações realizadas na cultura da soja, em ambas as áreas, foram: atributos de raiz (área superficial, volume, diâmetro médio, comprimento total e massa seca), diagnose foliar, extração e exportação de nutrientes, eficiências de aproveitamento do P e rendimento de grãos. Também foram avaliados os seguintes atributos químicos de solo: pH, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, S-SO₄²⁻ e P extraído por solução de Mehlich-1 e resina trocadora de ânions, nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm de profundidade. A aplicação de gesso agrícola em superfície não alterou a eficiência de uso (EUP) em curto prazo pela soja cultivada em LV e LVA, mas proporcionou aumento na eficiência agrônômica (EA) do P. Além disso, a aplicação de gesso na superfície do solo proporcionou economia com a adubação fosfatada e manteve elevado teto de rendimento de grãos de soja (acima de 4 t ha⁻¹). Isso foi constatado no solo argiloso (LV) em que houve interação significativa entre as doses de P e as doses de gesso no rendimento de grãos da cultura. Nesse caso, a produtividade de soja sem aplicação de P e com 2,5 t ha⁻¹ de gesso (4.064 kg ha⁻¹) foi semelhante àquelas obtidas com a aplicação de 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ (3.900 kg ha⁻¹), 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ (4.052 kg ha⁻¹) e 90 kg P₂O₅ ha⁻¹ (3.894 kg ha⁻¹), sem aplicação de gesso. No caso do LVA textura franco-arenosa, o rendimento de grãos ocorreu de forma independente da interação, tendo-se obtido maior produtividade de soja com a aplicação de 58 kg P₂O₅ ha⁻¹ e 2,1 t ha⁻¹ de gesso. A utilização de gesso agrícola em superfície, bem como a aplicação de P na semeadura, melhoraram de maneira independente, os atributos radiculares da soja cultivada nos solos de textura argilosa e franco-arenosa. Porém, o emprego da dose mais elevada de gesso agrícola (6 t ha⁻¹) sobre a superfície em conjunto com a dose mais elevada de P na semeadura (90 kg ha⁻¹ de P₂O₅), em solos que tinham altos teores de P, prejudicou o crescimento radicular e o rendimento de grãos de soja. A disponibilidade de P no solo influenciou o crescimento radicular da soja que, por sua vez, interferiu diretamente no rendimento de grãos da cultura. Por isso, a utilização de dose excessiva de gesso sobre a superfície associada com alta dose de P na semeadura da soja deve ser feita com cautela, principalmente em solos que já apresentem teores adequados de P disponível, para que o desempenho da cultura não seja prejudicado.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merril. Fosfogesso. Fósforo. Subsolo ácido. Sistema plantio direto.

EFFICIENCY OF PHOSPHATE FERTILIZER INFLUENCED BY GYPSUM APPLICATION IN PERFORMANCE OF SOYBEAN GROWN IN SOIL WITH DIFFERENT TEXTURES

3.2 ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the efficiency of phosphate fertilization influenced by the application of agricultural gypsum in the performance of soybean cultivated in soils with different textural classes. The experiments were installed in two Oxisols: Red Oxisol – LV, clay texture and Red-Yellow Oxisol – LVA, sandy-loam texture) located in the municipality of Ponta Grossa, Paraná, Brazil. The experimental design of the two soils was a randomized complete block in a split-plot, with three replications. In the plots, four rates of P (0, 30, 60 and 90 kg P₂O₅ ha⁻¹) in the form of triple superphosphate were applied at sowing and, in the subplots, four rates of agricultural gypsum (0, 2, 4 and 6 t ha⁻¹), on the soil surface, before sowing. The evaluations carried out in the soybean crop in both areas were: root attributes (surface area, volume, mean diameter, total length and dry mass), foliar diagnosis, nutrient extraction and export, P utilization efficiencies and grain yield. The following soil chemical attributes were evaluated: pH, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, S-SO₄²⁻ and P extracted with Mehlich-1 solution and anion exchange resin in layers 0–10, 10–20, 20–40 and 40–60 cm deep. The application of agricultural gypsum on the surface did not change the P use efficiency in the short term by the soybean cultivated in LV and LVA, but provided an increase in the P agronomic efficiency. In addition, the application of gypsum on the soil surface promoted economy with phosphate fertilization and maintained a high yield soybean grains (above 4 t ha⁻¹). This was verified in the clay soil (LV) in which there was a significant interaction between the P doses and the gypsum doses in the grain yield of the crop. In this case, soybean yield without application of P and with 2.5 t ha⁻¹ of gypsum (4,064 kg ha⁻¹) was similar to those obtained with the application of 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ (3,900 kg ha⁻¹), 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ (4,052 kg ha⁻¹) and 90 kg P₂O₅ ha⁻¹ (3,894 kg ha⁻¹), without the application of gypsum. In the case of the sandy-loam LVA, grain yield occurred independently of the interaction, resulting in higher soybean yield with the application of 58 kg P₂O₅ ha⁻¹ and 2.1 t ha⁻¹ of gypsum. The independently use of gypsum on the surface or P at sowing, improved the root attributes of soybean cultivated in clayey and sand-loamy soils. However, the use of the highest rate of agricultural gypsum (6 t ha⁻¹) on the surface together with the highest P rate at sowing (90 kg ha⁻¹ P₂O₅), in soils with high levels of P, harmed the root growth and the soybean grain yield. The availability of P in the soil influenced the root growth of the soybean, which in turn interfered directly at the grain yield of the crop. Therefore, the use of excessive rate of gypsum on the surface associated with high rate of P in soybean sowing should be done with caution, especially in soils that already have adequate levels of available P, so that the performance of the crop is not prejudiced.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merril. Phosphogypsum. Phosphorus. Subsoil acidity. No-till.

3.3 INTRODUÇÃO

Originária no extremo Oriente, a soja [*Glycine max* (L.) Merril.] é a oleaginosa mais cultivada no mundo, sendo considerada base da alimentação humana e animal. O Brasil é o segundo maior produtor da cultura, ficando atrás apenas dos Estados Unidos da América (USDA, 2016). A cultura da soja é responsável por 57% da área cultivada no Brasil, tendo ocorrido crescimento de 3,6% no último ano, de 32,1 milhões de hectares cultivados em 2014–15 para 33,2 milhões em 2015–16. O Estado do Paraná é o segundo maior produtor brasileiro da cultura, em uma área plantada de 5,2 milhões de hectares – sendo 92% das áreas em sistema plantio direto (SPD) – apresentando a melhor média de produtividade (3.293 kg ha⁻¹) do país na safra 2014–15 (CONAB, 2016; FEBRAPDP, 2014).

Além dos fatores genéticos, a produtividade da soja é definida pela interação da planta com o ambiente e às adequadas técnicas de manejo estabelecidas. O manejo eficiente da fertilidade do solo, envolvendo a adequada correção da acidez e adubação do solo, tem sido um dos fatores mais determinantes para o incremento da produtividade na cultura da soja (RAIJ, 2011). Desta forma, diversas pesquisas relacionadas à eficiência na utilização de fertilizantes têm sido realizadas, tendo em vista o alto custo desses insumos ao agricultor (ANDA, 2016; GUARESHI et al., 2008).

A grande maioria dos solos no Brasil apresenta problemas de acidez subsuperficial, uma vez que a incorporação do calcário não é praticada em SPD. Assim, camadas mais profundas do solo, normalmente abaixo dos 20 cm, podem permanecer com excesso de alumínio trocável (Al³⁺), mesmo quando a calagem tenha sido realizada de forma adequada (CAIRES et al., 2006b). A presença de altos teores de Al³⁺ pode causar toxicidade às plantas, afetando diretamente o desenvolvimento radicular e prejudicando a absorção de água e nutrientes (CONCEIÇÃO et al., 2008; FAGERIA & MOREIRA, 2011). De acordo com Menosso et al. (2000), a toxidez do Al³⁺ em plantas de soja, além de afetar as raízes, acarreta necrose nas folhas, curvamento nas bordas de folíolos, crescimento irregular das plantas, atraso na maturação e deficiência induzida de cálcio (Ca).

A utilização de gesso agrícola (CaSO₄.2H₂O) fornece Ca e enxofre (S–SO₄²⁻) para as plantas e auxilia na amenização da toxicidade do Al em profundidade. A amenização da toxicidade do Al³⁺ é favorecida pela presença do íon Ca²⁺, proveniente da dissociação do gesso. O Ca²⁺ pode deslocar o Al³⁺ do complexo de troca catiônica do solo para a solução, o qual tende a formar complexos com o íon SO₄²⁻, formando o AlSO₄⁺ (par iônico que apresenta

menor toxicidade às plantas), possibilitando maior produtividade de grãos (CAIRES et al., 2003; 2006a; 2011a,b; PAULETTI et al., 2014; ZANDONÁ et al., 2015).

Além dos problemas com elevada acidez nos solos brasileiros, a baixa disponibilidade de fósforo (P) também tem sido fator limitante à produtividade das culturas agrícolas no país devido, principalmente, à favorável adsorção dos íons fosfatos nas superfícies dos óxidos de ferro (Fe) e Al (NOVAIS & SMYTH, 1999; OLIVEIRA et al., 2014). As características e o teor dos constituintes minerais da fração argila também são responsáveis pela velocidade e intensidade do processo de passagem do P lábil (disponível) para P não-lábil. Os solos argilosos apresentam capacidade de adsorção de P superior aos solos arenosos, para uma mesma concentração do nutriente no solo (MACHADO et al., 2011). O P é um nutriente essencial às plantas e de extrema importância para o desenvolvimento radicular (FAGERIA, 2013). Participa de diversos processos metabólicos, estando diretamente relacionado à formação bioquímica do ATP, que é um composto imprescindível à fotossíntese (VANCE et al., 2003). Por esses motivos, embora o P seja exigido em menores quantidades que o nitrogênio (N) e o potássio (K) pelas plantas (IPNI, 2012), tem-se aplicado elevadas doses de fertilizantes fosfatados para obter teores adequados de P disponível no solo e suprir as necessidades das culturas (SANTOS et al., 2008) – aumentando ainda mais os custos de produção.

Segundo Vitti et al. (2008), o gesso agrícola apresenta, em média, cerca de 6,0 a 7,5 g kg⁻¹ de P₂O₅ em sua composição, podendo fornecer incrementos significativos de P no solo em doses mais elevadas (CAIRES et al., 2003; 2011b; RAMPIM et al., 2013). Além disso, o gesso agrícola pode ser encontrado a um custo comercial relativamente mais baixo para os agricultores (MELO et al., 2008). Assim, o gesso agrícola contribuindo com o fornecimento de P (a custos mais reduzidos), pode favorecer o desenvolvimento do sistema radicular e aumentar a eficiência de uso de P pela cultura da soja, principalmente em solos de constituição mais arenosa. Por outro lado, a aplicação de gesso agrícola pode favorecer o crescimento radicular das plantas, aumentando o volume de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, a absorção de P pelas plantas.

Considerando a escassez de informações na literatura a respeito desse assunto, as pesquisas relacionadas ao uso de fertilizantes fosfatados associado ao emprego de gesso agrícola podem trazer informações importantes em relação à eficiência do uso de P pelas culturas, a exemplo da soja – principal cultura econômica no Brasil. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da adubação fosfatada influenciada pela aplicação de gesso agrícola no desempenho da soja cultivada em solos sob plantio direto com diferentes classes texturais.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Localização e caracterização das áreas experimentais

Os experimentos foram instalados no ano de 2013 em dois Latossolos localizados no município de Ponta Grossa, Paraná, Brasil, classificados de acordo com a EMBRAPA (2013) como: (i) Latossolo Vermelho (LV), textura argilosa (25°03'23"S, 50°04'55"W e 972 m de altitude); e (ii) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura franco-arenosa (25°07'57"S, 50°02'11"W e 977 m de altitude). Os resultados de análises químicas e granulométricas dos solos, antes da instalação dos experimentos, estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resultados de análises químicas e granulométricas dos solos, antes da instalação dos experimentos.

Camada ---cm---	pH CaCl ₂	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P Mehlich-1	SO ₄ ²⁻ (¹)	V(²)	m(³)	C	Areia	Silte	Argila
		-----mmol _c dm ⁻³ -----				-----mg dm ⁻³ -----		----%----		g dm ⁻³	-----g kg ⁻¹ -----		
<i>Latossolo Vermelho (LV)</i>													
0–10	4,9	1	38	11	2,7	18,3	8,0	44	1,9	30	404	116	480
10–20	4,7	4	29	7	1,2	3,0	8,5	34	9,7	21	372	128	500
20–40	4,4	9	12	5	0,9	2,0	9,7	16	33,5	22	310	110	580
40–60	4,3	10	9	3	0,4	0,5	11,3	12	44,6	14	292	128	580
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)</i>													
0–10	5,4	0	26	19	3,9	21,5	4,2	55	0,0	13	770	51	160
10–20	4,7	3	15	6	2,2	10,2	4,3	32	11,5	9	770	73	180
20–40	4,4	8	6	4	1,3	2,2	5,4	16	41,5	6	739	61	200
40–60	4,3	9	5	4	1,1	1,9	6,2	15	47,1	4	722	77	200

(¹)SO₄²⁻ = enxofre na forma de sulfato extraído com solução de fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹; (²)V = saturação por bases; (³)m = saturação por alumínio.

O clima predominante na região, segundo o sistema de classificação de Köppen–Geiger (PEEL et al., 2007), é do tipo Cfb, com verões frescos e ocorrência de geadas frequentes durante o inverno, sem a presença de estação seca definida. As temperaturas máximas e mínimas para a região são de 22 e 13 °C, respectivamente. A precipitação pluvial anual é em torno de 1.550 mm. As médias históricas de temperatura do ar e precipitação pluvial (últimos 16 anos) e as ocorridas durante a safra 2013–14 em Ponta Grossa (PR) são mostradas na Figura 3.1.

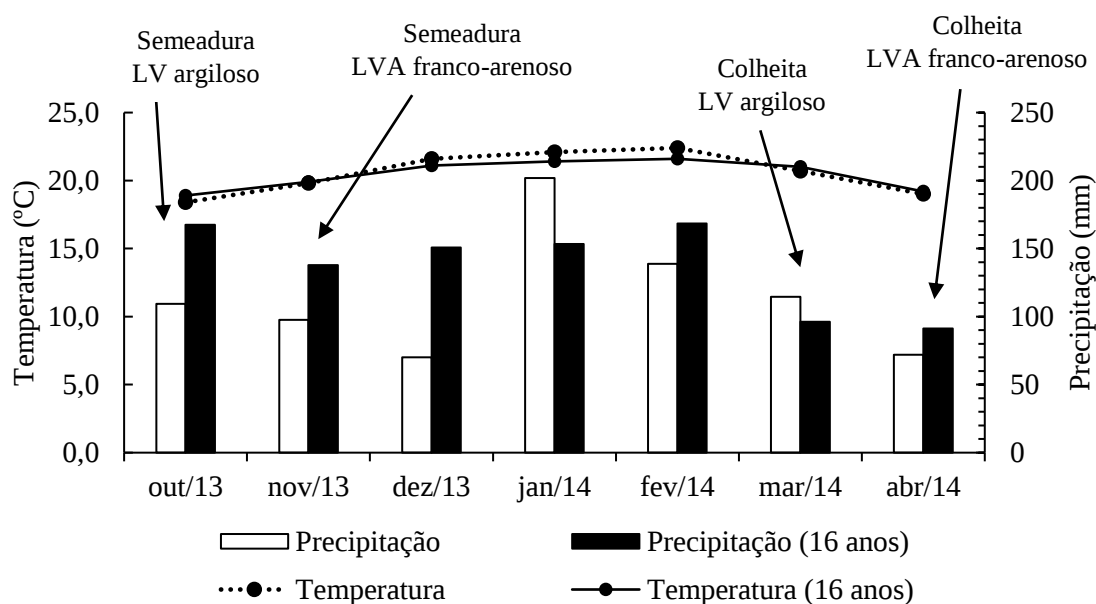


Figura 3.1 – Médias históricas de temperatura do ar e precipitação pluviométrica (16 anos) e as ocorridas durante a safra 2013–14 em Ponta Grossa, Paraná.
Fonte: Fundação ABC.

Considerando o período de desenvolvimento da soja em ambas as áreas, nota-se que houve desvios da precipitação média mensal em relação à histórica, com redução de chuva principalmente nos meses de outubro, novembro e dezembro de 2013. Por outro lado, observa-se que em janeiro de 2014 a média de precipitação mensal foi elevada (em torno de 200 mm), superando a média histórica. Para os meses de fevereiro, março e abril de 2014 as médias de precipitação foram similares à média histórica. Com relação a temperatura média do ar, observa-se que, durante o período que a cultura esteve em campo, as variações foram pequenas comparadas à média histórica (16 últimos anos).

Ambas as áreas vinham sendo cultivadas sob sistema plantio direto há cerca de 10 anos, com predominância da sucessão de cultivos soja–trigo. Na área do LV, apenas na safra de inverno de 2007 e 2013 foi cultivada aveia preta como cobertura de solo. No LVA, a aveia preta foi cultivada como cobertura de solo nos anos de 2006, 2008 e 2012. Salienta-se que, antes da instalação das parcelas experimentais no LV argiloso, foram aplicadas 2,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico na superfície e em área total em 12 julho de 2013.

3.4.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental empregado, nos dois solos, foi o de blocos completos ao acaso em parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas, com 180 m², foram

aplicadas quatro doses de P (0, 30, 60 e 90 kg P_2O_5 ha⁻¹) na forma de superfosfato triplo (SFT) e, nas subparcelas (45 m²), foram empregadas quatro doses de gesso agrícola (0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹). O gesso agrícola foi aplicado a lanço, na superfície e em área total, 15 dias antes da semeadura da soja (2013–14), e as doses de P foram aplicadas no sulco de semeadura. O SFT (granulado) continha a seguinte composição: 460, 380 e 130 g kg⁻¹ de P_2O_5 total, P_2O_5 solúvel em água e CaO, respectivamente. O gesso agrícola (moído, in natura) continha 227, 181 e 17 g kg⁻¹ de Ca, S–SO₄²⁻ e P_2O_5 , respectivamente, e 152 g kg⁻¹ de teor de água. Destaca-se que o gesso agrícola apresentou quantidade superior de P_2O_5 em sua composição em relação ao que tem sido descrito na literatura – 6,0 a 7,5 g kg⁻¹ (VITTI et al., 2008), não sendo, entretanto, uma seleção proposital.

3.4.3 Cultura da soja

O cultivar de soja utilizado, nos dois solos, foi o Nidera 5909 RG, que possui elevado potencial produtivo, ciclo de 115 a 130 dias, elevada resposta ao manejo da adubação e da cultura em geral. Trata-se de um cultivar com hábito de crescimento indeterminado, sendo, atualmente, um dos mais cultivados na região Centro-Sul do Paraná.

A semeadura da soja no LV (argiloso) foi realizada em 20 de outubro de 2013 (pós-aveia preta) e, no LVA (franco-arenoso) em 22 de novembro de 2013 (pós-trigo). O espaçamento utilizado foi de 0,45 m entre as linhas com densidade de semeadura de 14 sementes m⁻¹ (311 mil plantas ha⁻¹). Após a emergência das plântulas de soja, foi realizada adubação potássica aplicando-se, em superfície, 100 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de KCl, em ambos os solos. As sementes de soja foram inoculadas com estirpes selecionadas de *Bradyrhizobium japonicum* (100 ml para 50 kg de sementes – 5×10⁹ Ufc ml⁻¹) por ocasião da semeadura. As demais práticas culturais (tratamento de sementes, aplicação de herbicidas, fungicidas e inseticidas) foram realizadas de modo a permitir o adequado crescimento e desenvolvimento das plantas. A colheita dos grãos foi realizada em 10 de março de 2014 no LV e em 07 de abril de 2014 no LVA.

3.4.4 Avaliações

3.4.4.1 Avaliações e análises laboratoriais das plantas

Amostras de folhas de soja foram coletadas para fins de diagnose nutricional, retirando-se o terceiro trifólio a partir do ápice das plantas, em 30 plantas de cada subparcela, por ocasião do florescimento da cultura (estádio fenológico R2). A produção de massa seca (MS) e o acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas de soja foram avaliados na maturidade fisiológica da cultura (estádio fenológico R6). Para isso, foi coletado 1,0 m de plantas, somente a parte aérea, de cada subparcela.

As amostras de folhas para diagnose nutricional e as da parte aérea das plantas foram lavadas com água deionizada, secas em estufa a 60 °C, moídas em moinho com malha de 1,0 mm e armazenadas em embalagens plásticas até a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn, conforme os métodos descritos em Malavolta et al. (1997). A extração dos nutrientes pela parte aérea das plantas de soja foi calculada mediante multiplicação da concentração do nutriente pela MS correspondente.

Após a maturidade fisiológica, no estágio fenológico R8, a soja foi colhida em ambas as áreas (6,0 m² de cada subparcela) e trilhada, determinando-se o rendimento de grãos a 130 g kg⁻¹ de conteúdo de água. As concentrações dos nutrientes nos grãos de soja também foram determinadas de acordo com Malavolta et al. (1997). A exportação de nutrientes pelos grãos de soja foi calculada com base nos resultados de concentração de nutrientes e rendimento de grãos.

3.4.4.2 Avaliações e análises laboratoriais das raízes

Por ocasião do início da formação de vagens (estádio R3) foram retiradas seis subamostras de raízes (três na linha e três na entrelinha) para compor uma amostra composta, por meio de trado cilíndrico (3,6 cm de diâmetro), nas profundidades de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm. As amostras de raízes foram coletadas somente em quatro tratamentos, com três repetições: (i) sem gesso e sem P (testemunha); (ii) com gesso (6,0 t ha⁻¹) e sem P; (iii) sem gesso e com P (90 kg ha⁻¹ de P₂O₅); e (iv) com gesso e com P (6,0 t ha⁻¹ de gesso e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅).

As raízes foram separadas do solo por dispersão em água, utilizando-se peneira com malha de 0,5 mm e separadas de eventuais partículas orgânicas por triagem manual

utilizando-se pinça com ponta curva. Na sequência, as raízes foram coloridas com solução de permanganato de potássio a 1,0% e fotografadas com câmera de 13 Megapixels e resolução de 4.128×3.096 pixels. Por meio da utilização do software Safira versão 2010 (EMBRAPA, 2010; JORGE & SILVA, 2010), as imagens foram analisadas, determinando-se a área superficial, o volume, o diâmetro médio e o comprimento total. Depois, as amostras foram secas em estufa à 60 °C e pesadas para a determinação da massa seca de raízes (MSR).

3.4.4.3 Avaliações e análises laboratoriais dos solos

Amostras de solo foram coletadas nos dois solos, após a colheita da soja, nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm de profundidade. Foram retiradas 15 subamostras de cada subparcela com trado calador para constituir uma amostra composta das camadas de 0–10 e 10–20 cm, e cinco subamostras com trado holandês das camadas de 20–40 e 40–60 cm. Depois de secas em estufa com circulação forçada de ar a 40 °C, as amostras de solo foram destorroadas, moídas e passadas em peneira com malha de 2,0 mm. Nessas amostras foram determinados o pH em CaCl_2 0,01 mol L⁻¹; os teores de Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} com solução KCl 1,0 mol L⁻¹; K^+ e P com solução de Mehlich-1; e enxofre (S-SO_4^{2-}) com solução de fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹, conforme métodos propostos por Pavan et al. (1992) e Cantarella & Prochnow (2001). O P disponível também foi avaliado pelo método da resina trocadora de ânions (RTA), de acordo com metodologia de Raij & Quaggio (2001).

3.4.5 Efeitos da aplicação de gesso na eficiência da adubação fosfatada

As seguintes eficiências foram calculadas com base na metodologia de Fageria et al. (1998), considerando-se as doses de P (kg P₂O₅ ha⁻¹) aplicadas nos tratamentos sem gesso e com 2, 4 e 6 t ha⁻¹ de gesso:

3.4.5.1 Eficiência agronômica (EA, kg kg⁻¹)

$$\text{EA, kg kg}^{-1} = \frac{\text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}{\text{Dose de P aplicada (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

3.4.5.2 Eficiência fisiológica (EF, kg kg⁻¹)

$$EF, \text{kg kg}^{-1} = \frac{\text{Produção de MS (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{Produção de MS (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}{\text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}$$

onde, MS é a massa seca total da parte aérea da planta de soja.

3.4.5.3 Eficiência agrofisiológica (EAF, kg kg⁻¹)

$$EAF, \text{kg kg}^{-1} = \frac{\text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}{\text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}$$

3.4.5.4 Eficiência na recuperação aparente (ERA, kg kg⁻¹)

$$ERA, \text{kg kg}^{-1} = \frac{\text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}{\text{Dose de P aplicada (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

3.4.5.5 Fator parcial de produtividade (FPP, kg kg⁻¹)

$$FPP, \text{kg kg}^{-1} = \frac{\text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) com P}}{\text{Dose de P aplicada (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

3.4.5.6 Eficiência de uso do P (EUP, kg kg⁻¹)

$$EUP, \text{kg kg}^{-1} = EF \times ERA$$

3.4.6 Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos às análises de variância e de regressão. Equações de regressão por polinômios ortogonais foram ajustadas aos dados obtidos em função das doses de gesso e de P aplicadas. Na ausência de interação significativa entre doses de P × doses de gesso, foram consideradas as médias das observações e, no caso de interação significativa, realizou-se os desdobramentos. Foram consideradas somente as equações de regressão significativas a 5%. Os resultados de atributos de raízes foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5%, procedendo-se o desdobramento

dos tratamentos quando a interação foi significativa. As análises estatísticas foram realizadas por meio da utilização do programa Sisvar versão 5.6 (FERREIRA, 2014). Foram realizadas correlações de Pearson (r) entre: (i) os atributos de raízes e os atributos químicos de solo; (ii) o rendimento de grãos e a exportação de nutrientes; e (iii) o rendimento de grãos e os atributos de raízes (densidade de comprimento e comprimento radicular por área). As correlações foram realizadas com a utilização do programa SPSS Statistcs Base versão 22.0 (IBM, 2013).

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Alterações nos atributos químicos dos solos após a colheita da soja

3.5.1.1 Latossolo Vermelho (LV)

Não houve interação significativa entre doses de P e doses de gesso para a maioria dos atributos químicos de solo avaliados nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm (Tabelas 3.2 e 3.3) do LV, exceto para o teor de cálcio trocável do solo (Ca^{2+}) e para a saturação por alumínio (m%) na camada 0–10 cm (Tabela 3.4).

Na Tabela 3.2 estão apresentados os efeitos independentes das doses de P aplicadas na semeadura da soja no LV. Observa-se que o acréscimo das doses de P não influenciou significativamente a acidez ativa (pH em CaCl_2), a acidez trocável (Al^{3+}) e a saturação por Al (m%) nas quatro camadas de solo estudadas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). De forma isolada, as doses de P também não interferiram nos teores de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e na relação Ca:Mg do solo, em todas as camadas de solo amostradas (Tabela 3.2).

Nas camadas mais superficiais, de 0–10 e 10–20 cm, os teores de P no solo foram aumentados com as doses de P quando se utilizou a solução extratora de Mehlich-1, e também, pelo método da resina trocadora de ânions (RTA). Entretanto, em camadas mais profundas, de 20–40 e 40–60 cm, verificou-se aumento linear de P no solo apenas com o uso do extrator de Mehlich-1. Com exceção da camada 10–20 cm de profundidade, os teores de S-SO_4^{2-} do solo aumentaram linearmente com o incremento das doses de P na camada mais superficial de 0–10 cm, e nas camadas mais profundas de 20–40 e 40–60 cm (Tabela 3.2).

Na Tabela 3.3 podem ser observadas as alterações químicas do solo devido à aplicação das doses de gesso em superfície, independente das doses de P, pouco antes da semeadura da soja no LV. Observa-se que a acidez ativa (pH) não foi alterada com o aumento das doses de gesso, em todas as camadas estudadas, e a acidez trocável (Al^{3+}) foi reduzida linearmente com as doses de gesso nas camadas de 0–10 e 20–40 cm. Embora a m% não tenha sido afetada pelo gesso na camada mais superficial (0–10 cm), observou-se significativa redução desse atributo com as doses de gesso agrícola aplicadas, em todas as camadas subsuperficiais do solo (10–20, 20–40 e 40–60 cm).

Tabela 3.2 – Alterações nos atributos químicos do solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação de doses de fósforo no Latossolo Vermelho textura argilosa.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P Mehlich	P Resina	SO ₄ ²⁻	m ⁽¹⁾	Ca:Mg
		-----mmol _c dm ⁻³ -----				-----mg dm ⁻³ -----			%	
Camada de 0–10 cm										
0	4,7	2,2	47,8	14,8	3,7	16,1	26,1	22,2	3,4	3,3
30	4,8	1,5	50,4	16,9	3,6	16,9	28,0	22,4	2,1	3,0
60	4,8	1,8	51,6	15,3	3,5	18,2	29,0	22,2	2,6	3,4
90	4,7	2,1	49,4	14,6	3,4	24,0	37,1	25,6	3,1	3,5
Efeito	ns	ns	-	ns	ns	L**	L**	L*	-	ns
CV (%)	1,6	40,1	11,0	15,7	23,0	17,7	21,7	14,5	30,4	15,8
Camada de 10–20 cm										
0	4,5	7,0	31,1	14,8	2,1	3,9	9,7	31,2	13,4	2,1
30	4,5	7,3	31,9	15,3	1,8	4,3	10,6	26,9	13,1	2,2
60	4,5	7,0	31,1	15,0	1,9	4,6	11,9	31,0	13,1	2,1
90	4,4	7,3	30,8	13,2	1,9	5,2	12,4	34,0	13,9	2,4
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	L*	L**	ns	ns	ns
CV (%)	2,9	25,2	10,7	26,2	18,3	25,0	11,6	19,1	21,6	28,9
Camada de 20–40 cm										
0	4,4	10,2	20,8	14,3	1,2	2,1	6,8	33,3	22,5	1,5
30	4,3	10,7	20,1	14,0	1,2	2,2	7,0	30,2	23,8	1,5
60	4,4	10,4	20,8	14,5	1,6	2,6	6,3	36,1	22,4	1,5
90	4,3	10,8	19,3	12,9	1,4	2,5	6,2	42,2	24,5	1,5
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	L*	ns	L*	ns	ns
CV (%)	2,5	15,6	9,7	31,4	24,0	31,3	27,5	23,7	22,0	36,4
Camada de 40–60 cm										
0	4,3	11,2	13,8	10,5	0,7	1,0	4,1	19,8	31,4	1,3
30	4,3	11,6	13,8	10,7	0,7	1,0	4,7	18,6	32,0	1,3
60	4,3	11,3	14,9	10,5	0,9	1,2	4,3	25,2	30,3	1,4
90	4,3	12,3	14,0	10,2	0,8	1,7	4,6	26,5	33,3	1,4
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	L*	ns	L**	ns	ns
CV (%)	1,9	13,2	13,5	10,8	19,8	26,7	18,1	16,0	12,4	13,9

⁽¹⁾m = saturação por alumínio. L = efeito linear por análise de regressão; ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

Variações nos teores de Ca²⁺ foram observadas nas quatro camadas estudadas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm), ocorrendo aumento linear desse nutriente no solo com o emprego das doses de gesso. Na camada mais superficial do solo (0–10 cm), as doses de gesso agrícola reduziram significativamente os teores de K⁺ e Mg²⁺. Por outro lado, observou-se aumento linear nos teores de K⁺ nas demais camadas estudadas (10–20, 20–40 e 40–60 cm), e de Mg²⁺ na camada mais profunda (40–60 cm), indicando movimentação desses cátions no perfil do solo com o acréscimo das doses de gesso. Nas camadas de 10–20 e 20–40 cm não foram

detectadas alterações nos teores de Mg^{2+} do solo (Tabela 3.3). Devido ao significativo aumento do Ca^{2+} no solo, também notou-se aumento linear da relação Ca:Mg em todas as camadas de solo com o emprego do gesso agrícola.

As doses de gesso aplicadas aumentaram linearmente os teores de P nas camadas mais superficiais do solo, de 0–10 e 10–20 cm, pelos dois extratores (Mehlich-1 e RTA), enquanto que, em maior profundidade (camadas de 20–40 e 40–60 cm), o aumento de P foi observado apenas com a utilização do extrator de Mehlich-1. As doses de gesso aumentaram de forma linear e expressiva os teores de SO_4^{2-} em todas as camadas de solo avaliadas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm) (Tabela 3.3).

A análise de variância revelou interação significativa entre as doses de P e gesso para os teores de Ca^{2+} na camada 0–10 cm. O acréscimo das doses de P, nas doses de 2 e 4 t ha⁻¹ de gesso, aumentou linearmente os teores de Ca^{2+} , mas na maior dose de gesso (6 t ha⁻¹), o aumento das doses de P ocasionou significativa redução nos teores de Ca^{2+} no solo. Observou-se também que nos tratamentos sem P e com 30 e 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, o incremento nas doses de gesso aumentou linearmente os teores de Ca^{2+} no solo. Entretanto, na maior dose de P (90 kg P₂O₅ ha⁻¹), as doses de gesso (x , em t ha⁻¹) influenciariam os teores de Ca^{2+} no solo ($\hat{y}$, em mmol_c dm⁻³) conforme o modelo quadrático [$\hat{y} = 46,8 + 2,8x - 0,413x^2$; $R^2 = 0,74$] (Tabela 3.4).

O desdobramento da interação para a saturação por Al (m%) na camada 0–10 cm mostrou que, o aumento das doses de P, sem a aplicação de gesso, causou redução linear na m%, mas para a maior dose de gesso (6 t ha⁻¹), ocorreu o inverso, ou seja, as doses de P aumentaram linearmente a m% do solo. Para as doses de 2 e 4 t ha⁻¹ de gesso, o incremento de P no solo não influenciou a m%. Por outro lado, verificou-se que o incremento das doses de gesso no solo, na ausência de P, ocasionou redução linear na m%, mas na maior dose de P (90 kg P₂O₅ ha⁻¹), causou significativo aumento na m%. Nas doses de 30 e 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, não foi observada influência das doses de gesso na m% (Tabela 3.4).

Tabela 3.3 – Alterações nos atributos químicos do solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação das doses de gesso agrícola no Latossolo Vermelho textura argilosa.

Gesso (t ha ⁻¹)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	P	SO ₄ ²⁻	m ⁽¹⁾	Ca:Mg
						Mehlich	Resina			
		-----mmol _c dm ⁻³ -----					-----mg dm ⁻³ -----			%
Camada de 0–10 cm										
0	4,7	2,2	46,3	16,7	4,0	16,4	27,8	4,1	3,1	2,8
2	4,7	1,8	48,5	16,1	3,5	18,3	29,3	18,4	2,8	3,1
4	4,7	1,9	50,4	14,6	3,4	19,7	30,4	28,0	2,8	3,5
6	4,8	1,7	53,9	14,3	3,2	20,8	32,7	41,8	2,4	3,9
Efeito	ns	L*	L**	L**	L**	L**	L**	L**	-	L**
CV (%)	3,2	48,5	9,5	12,9	13,7	21,1	11,5	22,9	40,2	15,2
Camada de 10–20 cm										
0	4,5	8,1	27,0	14,7	1,8	4,0	9,9	5,1	15,6	1,9
2	4,5	6,8	29,4	14,8	1,8	4,0	10,7	26,1	13,0	2,1
4	4,5	6,7	33,5	14,8	1,9	4,5	11,6	39,1	12,0	2,4
6	4,5	7,0	35,1	13,9	2,2	5,4	12,3	52,8	12,5	2,6
Efeito	ns	ns	L**	ns	L*	L**	L**	L**	L**	L**
CV (%)	2,5	22,8	12,3	19,1	20,4	27,8	14,2	20,1	23,1	23,1
Camada de 20–40 cm										
0	4,3	11,9	15,3	13,0	1,3	2,1	6,1	7,7	29,0	1,2
2	4,4	10,3	20,3	13,6	1,3	2,3	6,7	28,7	22,8	1,6
4	4,4	10,2	22,5	14,3	1,3	2,3	6,6	46,0	21,4	1,6
6	4,4	9,7	22,9	14,8	1,5	2,7	6,9	59,6	20,1	1,6
Efeito	ns	L*	L**	ns	L*	L*	ns	L**	L**	L**
CV (%)	2,4	20,4	14,3	19,5	21,3	30,5	17,4	20,7	19,5	24,5
Camada de 40–60 cm										
0	4,3	12,2	11,8	9,9	0,7	1,2	4,0	10,5	35,5	1,2
2	4,3	11,7	12,8	10,3	0,8	1,2	4,9	24,2	32,9	1,3
4	4,3	11,3	15,3	10,8	0,8	1,2	4,5	25,2	29,8	1,5
6	4,3	11,3	16,6	10,9	0,8	1,4	4,3	33,2	28,8	1,6
Efeito	ns	ns	L**	L*	L*	L*	ns	L**	L**	L**
CV (%)	1,4	9,6	13,4	17,5	20,7	24,0	21,6	25,2	10,7	23,9

⁽¹⁾m = saturação por alumínio. L = efeito linear por análise de regressão; ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

Tabela 3.4 – Desdobramento da interação para o teor de Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e para a saturação por alumínio (m%) na camada 0–10 cm, após a aplicação das doses de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso (t ha ⁻¹)				Efeito	R ²
	0	2	4	6		
<i>Ca²⁺ (mmolc dm⁻³)</i>						
0	44,0	43,0	46,7	57,7	L**	0,73
30	45,1	51,7	48,3	56,7	L**	0,67
60	49,0	50,0	54,0	53,3	L*	0,79
90	47,3	49,3	52,7	48,1	Q*	0,74
Efeito	ns	L*	L*	L**		
R ²	-	0,55	0,77	0,92		
<i>Saturação por alumínio (m%)</i>						
0	4,8	4,4	3,3	1,0	L**	0,89
30	3,0	1,4	2,4	1,7	ns	-
60	2,3	2,9	2,8	2,3	ns	-
90	2,5	2,5	2,7	4,7	L*	0,68
Efeito	L*	ns	ns	L*		
R ²	0,76	-	-	0,88		

L = efeito linear por análise de regressão. Q = efeito quadrático por análise de regressão. ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$ e ns: não significativo.

3.5.1.2 Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)

No LVA houve interação significativa entre doses de P e doses de gesso apenas para os teores de Ca^{2+} e para a m% na camada amostrada de 40–60 cm (Tabela 3.7). Para os demais atributos do solo, os efeitos observados ocorreram de maneira independente, em todas as camadas avaliadas (Tabelas 3.5 e 3.6). Considerando as doses de P (Tabela 3.5), observou-se que a adubação fosfatada não exerceu influência sobre a acidez ativa, a acidez trocável e a m%, e também não alterou significativamente os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ no solo, em nenhuma das profundidades estudadas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). Todavia, para a relação Ca:Mg, verificou-se que na camada 20–40 cm a relação foi reduzida linearmente com as doses de P, enquanto que nas demais camadas (0–10, 10–20 e 40–60 cm), as doses de P não influenciaram a relação Ca:Mg no solo.

As doses de P proporcionaram aumento nos teores de P na camada mais superficial do solo (0–10 cm), tanto pelo extrator de Mehlich-1 quanto pela RTA. Porém, nas camadas subsequentes, de 10–20 e 20–40 cm, apenas o extrator de Mehlich-1 revelou aumento nos teores de P no solo devido à adubação fosfatada. Na camada mais profunda, de 40–60 cm, não houve alteração do P, para ambos os métodos de extração utilizados. Exceto na camada mais

profunda (40–60 cm), observou-se que o SO_4^{2-} foi aumentado linearmente pelas doses de P em todas as demais camadas (0–10, 10–20 e 20–40 cm) (Tabela 3.5).

Na Tabela 3.6 podem ser observados os efeitos das doses de gesso sobre os atributos de fertilidade do solo. Observou-se que as doses de gesso não alteraram os valores de pH do solo em nenhuma das camadas avaliadas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). Os teores de Al^{3+} não foram alterados nas camadas de 0–10 e 40–60 cm, e foram reduzidos pelas doses de gesso, de forma linear, nas camadas de 10–20 e 20–40 cm. De forma independente, o gesso causou redução linear da m% nas camadas mais profundas do solo (20–40 e 40–60 cm), enquanto que nas camadas mais superficiais (0–10 e 10–20 cm), a m% não foi influenciada.

O gesso agrícola influenciou os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e a relação Ca:Mg em todas as camadas de solo amostradas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). De forma independente, as doses de gesso causaram aumento linear nos teores de Ca^{2+} em todas as camadas de solo estudadas. Os teores de Mg^{2+} foram reduzidos linearmente nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–40 cm, e aumentados linearmente na camada mais profunda do solo (40–60 cm), indicando a movimentação vertical desse cátion pelo gesso agrícola. Com o aumento significativo do Ca^{2+} no solo, a relação Ca:Mg também aumentou linearmente com as doses de gesso, em todas as camadas de solo avaliadas. As doses de gesso agrícola reduziram os teores de K^+ nas camadas mais superficiais (0–10 e 10–20 cm) e aumentaram os teores desse nutriente nas camadas mais profundas do solo, de 20–40 e 40–60 cm (Tabela 3.6).

Nota-se na Tabela 3.6 que houve aumento linear nos teores de P no solo com as doses de gesso agrícola, pelos dois extratores (Mehlich-1 e RTA), nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–40 cm. Porém, na camada mais profunda do solo (40–60 cm), apenas o extrator de Mehlich-1 revelou aumento linear do P no solo com as doses de gesso.

Tabela 3.5 – Alterações nos atributos químicos do solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação das doses de fósforo no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	pH CaCl ₂	Al ³⁺ -----mmol _c dm ⁻³ -----	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P Mehlich	P Resina	SO ₄ ²⁻ -----mg dm ⁻³ -----	m ⁽¹⁾ %	Ca:Mg
Camada de 0–10 cm										
0	5,2	0,0	38,3	15,8	3,5	30,8	31,8	6,9	0,0	2,6
30	5,2	0,0	41,6	14,6	3,4	31,7	40,0	9,9	0,0	3,0
60	5,3	0,0	41,0	15,5	3,2	33,8	39,8	10,0	0,0	3,0
90	5,3	0,0	41,8	14,3	3,2	39,5	43,6	10,3	0,0	3,1
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	L**	L**	L*	ns	ns
CV (%)	2,9	0,0	14,4	10,5	16,9	13,8	12,8	25,3	0,0	19,6
Camada de 10–20 cm										
0	4,9	1,8	20,8	12,3	2,5	4,3	13,7	8,9	5,0	1,8
30	4,9	1,4	23,8	12,8	2,5	5,7	13,5	10,4	3,7	2,0
60	4,9	1,7	22,7	12,5	2,5	9,4	13,7	11,7	4,5	1,9
90	4,8	2,1	22,1	13,3	2,4	9,5	14,0	12,1	5,4	1,7
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	L**	ns	L*	ns	ns
CV (%)	5,0	31,2	5,0	11,3	6,7	16,8	28,5	25,1	32,8	13,5
Camada de 20–40 cm										
0	4,6	5,2	14,1	6,4	2,1	2,0	7,7	19,1	18,8	2,5
30	4,5	5,0	14,4	6,4	2,1	2,3	7,6	23,7	18,3	2,3
60	4,5	5,0	13,3	7,5	2,0	2,6	7,0	25,6	18,2	1,9
90	4,5	5,7	15,4	7,7	2,0	2,8	7,0	29,4	18,8	2,0
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	L*	ns	L**	ns	L*
CV (%)	7,1	31,4	25,1	22,6	12,3	23,0	22,0	25,9	33,0	28,5
Camada de 40–60 cm										
0	4,3	8,7	7,7	6,2	1,3	0,9	6,7	45,2	36,9	1,2
30	4,3	8,8	7,4	6,8	1,4	0,8	7,7	46,2	37,0	1,1
60	4,4	8,8	7,6	8,4	1,4	1,0	7,6	46,1	33,6	1,0
90	4,3	8,8	8,4	7,4	1,3	1,0	6,7	46,9	34,0	1,2
Efeito	ns	ns	-	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns
CV (%)	3,3	28,4	22,7	17,2	11,2	24,3	27,8	23,8	22,3	38,8

⁽¹⁾m = saturação por alumínio. L = efeito linear por análise de regressão; ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

Tabela 3.6 – Alterações nos atributos químicos do solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação das doses de gesso no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Gesso (t ha ⁻¹)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	P	SO ₄ ²⁻	m ⁽¹⁾	Ca:Mg
							Mehlich	Resina		
		-----mmol _c dm ⁻³ -----					-----mg dm ⁻³ -----		%	
Camada de 0–10 cm										
0	5,2	0,0	32,9	18,5	4,8	28,2	33,7	4,8	0,0	1,8
2	5,2	0,0	40,5	15,5	3,3	30,5	35,1	9,7	0,0	2,7
4	5,3	0,0	44,0	13,6	2,8	38,1	42,2	10,4	0,0	3,3
6	5,3	0,0	45,3	12,7	2,4	39,0	44,3	12,2	0,0	3,7
Efeito	ns	ns	L**	L**	L**	L**	L**	L**	ns	L**
CV (%)	4,0	0,0	9,7	14,8	13,1	11,4	12,8	22,1	0,0	18,4
Camada de 10–20 cm										
0	4,8	2,3	19,8	14,3	2,7	5,6	12,0	5,4	6,2	1,4
2	4,9	1,7	22,2	12,8	2,6	5,9	13,4	8,9	4,4	1,7
4	4,9	1,5	23,4	13,6	2,6	8,6	13,7	12,7	6,8	1,7
6	4,9	1,5	24,2	10,2	2,2	8,8	15,8	16,1	4,1	2,5
Efeito	ns	L*	L**	L**	L**	L**	L**	L**	ns	L**
CV (%)	4,6	42,6	14,5	12,6	11,8	22,7	20,5	17,9	41,9	18,8
Camada de 20–40 cm										
0	4,5	5,6	12,6	8,3	1,8	2,2	6,8	12,3	20,1	1,6
2	4,5	5,2	13,6	6,8	1,9	2,4	7,5	21,1	19,1	2,0
4	4,6	5,2	13,9	6,6	2,2	2,5	7,6	23,2	18,7	2,2
6	4,6	4,9	17,2	6,3	2,2	2,7	7,7	41,4	16,2	3,0
Efeito	ns	L*	L**	L**	L**	L*	L*	L**	L*	L**
CV (%)	5,9	39,2	21,9	13,8	12,1	19,0	14,3	24,9	29,1	26,5
Camada de 40–60 cm										
0	4,3	8,8	5,1	6,7	1,0	0,5	7,2	28,4	40,7	0,8
2	4,3	8,8	8,1	6,8	1,3	1,0	7,2	41,8	35,3	1,2
4	4,3	8,8	8,0	7,5	1,5	1,0	7,1	54,6	34,3	1,1
6	4,4	8,8	9,9	7,8	1,6	1,1	7,2	59,6	31,1	1,3
Efeito	ns	ns	L**	L*	L**	L**	ns	L**	L**	L**
CV (%)	3,0	16,1	21,4	16,6	16,9	16,3	21,3	17,8	14,4	28,3

⁽¹⁾m = saturação por alumínio. L = efeito linear por análise de regressão; ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

O desdobramento da interação para o Ca²⁺ no solo na camada 40–60 cm (Tabela 3.7) demonstrou que ocorreu aumento linear desse nutriente no solo com o aumento das doses de P, na ausência de gesso e na dose 2 t ha⁻¹ de gesso. Já, na dose de 4 t ha⁻¹ de gesso, não houve alteração nos teores de Ca²⁺ com o acréscimo das doses de P. Por outro lado, na maior dose de gesso (6 t ha⁻¹), as doses de P ocasionaram significativa redução nos teores de Ca²⁺ no solo. Verifica-se que na ausência de P e nas doses de 30 e 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, o acréscimo das doses de gesso agrícola no solo promoveu aumento linear do Ca²⁺. Entretanto, na maior dose de P

(90 kg P_2O_5 ha⁻¹), o incremento das doses de gesso não influenciou significativamente o teor de Ca^{2+} no solo.

A interação entre as doses de P e gesso sobre a m% na camada 40–60 cm pode ser observada na Tabela 3.7. O aumento das doses de P, na ausência de gesso e na dose de 2 t ha⁻¹ de gesso, ocasionou significativa redução da m% no solo. Entretanto, houve aumento linear na m% com o acréscimo das doses de P, na maior dose de gesso agrícola aplicada (6 t ha⁻¹). O incremento das doses de gesso na superfície, na ausência de P e na dose de 30 kg P_2O_5 ha⁻¹, ocasionou redução na m%. Todavia, nas maiores doses de P (60 e 90 kg ha⁻¹), a m% não foi alterada significativamente com as doses de gesso.

Tabela 3.7 – Desdobramento da interação para o teor de Ca^{2+} (mmol_c dm⁻³) e para a saturação por alumínio (m%) na camada 40–60 cm, após a aplicação das doses de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso (t ha ⁻¹)				Efeito	R ²
	0	2	4	6		
<i>Ca²⁺ (mmol_c dm⁻³)</i>						
0	4,3	6,0	8,7	11,7	L**	0,98
30	4,3	7,7	8,3	9,4	L**	0,87
60	4,0	9,3	7,7	9,4	L*	0,54
90	7,7	9,3	7,3	9,1	ns	-
Efeito	L*	L*	ns	L*		
R ²	0,52	0,89	-	0,60		
<i>Saturação por alumínio (m%)</i>						
0	47,6	39,4	34,7	25,8	L**	0,98
30	45,3	38,9	33,3	30,4	L**	0,98
60	37,3	30,1	33,1	33,8	ns	-
90	32,4	32,6	36,2	34,6	ns	-
Efeito	L**	L*	ns	L*		
R ²	0,96	0,66	-	0,92		

L = efeito linear por análise de regressão. Q = efeito quadrático por análise de regressão. **p<0.01, *p<0.05 e ns: não significativo.

3.5.2 Alterações nos atributos radiculares

3.5.2.1 Massa seca de raízes de soja

No LV, a massa seca de raízes (MSR) de soja foi influenciada pela interação entre doses de P e doses de gesso apenas na camada de 20–40 cm, enquanto que, nas demais camadas, os efeitos foram independentes (Tabela 3.8). Os tratamentos não influenciaram a MSR na camada mais superficial (0–10 cm) e nem na camada mais profunda (40–60 cm). Porém, na camada de 10–20 cm, a aplicação de P na semeadura de soja, independente do gesso agrícola, proporcionou maior quantidade de MSR. Na camada de 20–40 cm, o desdobramento da interação mostrou que a aplicação de gesso aumentou a MSR, sem e com adição de P, mas a adubação fosfatada ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) reduziu a MSR no tratamento com gesso (6 t ha^{-1}).

Para a soja cultivada no LVA, não houve interação entre doses de P e doses de gesso para MSR em nenhuma das camadas de solo amostradas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). Na camada de 0–10, 10–20 e 40–60 cm, a aplicação de P na semeadura, independente do gesso, aumentou a MSR de soja. Já, na camada de 10–20 cm, observou-se que a aplicação de gesso, independente da adição de P, proporcionou aumento na MSR de soja. Todavia, a MSR não foi influenciada pelos tratamentos na camada de 20–40 cm (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 – Massa seca (mg dm^{-3}) de raízes de soja após a aplicação de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso		Média	CV (%)
	Sem Gesso	Com 6 t ha ⁻¹⁽¹⁾		
<i>Latossolo Vermelho (LV)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	468,3	583,4	525,9 a	30,1
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	492,6	671,0	581,8 a	
Média	480,5 A	627,2 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	100,9	140,8	120,9 b	19,0
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	162,9	154,7	158,8 a	
Média	131,9 A	147,8 A		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	26,7 Ba	67,5 Aa	47,1	20,1
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	34,4 Ba	54,5 Ab	44,5	
Média	30,6	61,0		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	20,5	30,1	25,3 a	27,3
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	33,2	30,4	31,8 a	
Média	26,9 A	30,3 A		
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	424,9	550,2	487,6 b	6,1
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	667,3	677,1	672,2 a	
Média	545,7 A	613,7 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	87,2	178,5	132,9 b	15,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	148,6	142,5	145,6 a	
Média	117,9 B	160,5 A		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	59,8	72,9	66,4 a	15,7
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	81,1	74,1	76,1 a	
Média	70,5 A	73,5 A		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	45,4	54,0	49,7 b	10,5
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	57,3	61,0	59,2 a	
Média	51,4 A	57,5 A		

⁽¹⁾ Gesso agrícola aplicado antes da semeadura. ⁽²⁾ Fósforo aplicado na semeadura na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p=0.05$).

3.5.2.2 Volume de raízes de soja

No LV, a análise de variância revelou interação significativa entre doses de P e doses de gesso para o volume de raízes apenas na camada de 40–60 cm. Nas camadas mais superficiais (0–10 e 10–20 cm), o volume das raízes foi alterado pelos efeitos isolados dos tratamentos, e na camada de 20–40 cm não foi influenciado pelos tratamentos (Tabela 3.9). Observou-se que na camada superficial, de 0–10 cm, ocorreu aumento no volume de raízes com a aplicação de gesso agrícola, enquanto que na camada de 10–20 cm, o volume foi maior devido à adição do P na semeadura da soja. Considerando a interação entre os tratamentos na camada mais profunda (40–60 cm), houve significativo aumento no volume de raízes com a aplicação de gesso sem P e com a aplicação de P sem gesso. Por outro lado, houve significativa redução no volume de raízes com a aplicação conjunta de P ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) e gesso (6 t ha^{-1}).

Na Tabela 3.9 também são mostrados os efeitos dos tratamentos no volume de raízes da soja cultivada no LVA (franco-arenoso). Houve interação significativa entre as doses de P e as doses de gesso apenas na camada de solo mais profunda (40–60 cm). Nas camadas mais superficiais, de 0–10 e 10–20 cm, houve efeito isolado dos tratamentos, tendo ocorrido aumento no volume de raízes com a aplicação de gesso e também com a aplicação de P. O volume de raízes na camada de 20–40 cm não foi alterado pelos tratamentos. O desdobramento da interação na camada 40–60 cm revelou que o volume de raízes foi significativamente reduzido quando se aplicaram 6 t ha^{-1} de gesso em superfície e $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ na semeadura da soja.

Tabela 3.9 – Volume ($\text{mm}^3 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de soja após a aplicação de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso		Média	CV (%)
	Sem Gesso	Com 6 t ha ⁻¹⁽¹⁾		
<i>Latossolo Vermelho (LV)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	6,75	13,83	10,28 a	19,4
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	7,00	10,07	8,53 a	
Média	6,87 B	11,94 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	2,39	4,28	3,34 b	36,3
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	6,38	4,01	5,21 a	
Média	4,38 A	4,15 A		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	1,79	1,74	1,77 a	13,8
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,49	1,83	1,66 a	
Média	1,64 A	1,79 A		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	1,27 Bb	1,77 Aa	1,52	16,4
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,72 Aa	1,39 Bb	1,54	
Média	0,77	0,82		
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	4,80	9,18	6,98 b	22,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	7,99	10,90	9,45 a	
Média	6,40 B	10,03 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	1,45	3,07	2,24 b	21,7
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	3,01	2,12	2,57 a	
Média	2,16 B	2,57 A		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	1,56	1,60	1,58 a	25,1
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,64	1,87	1,76 a	
Média	1,60 A	1,74 A		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	1,33Ab	1,96 Aa	1,64	13,3
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	2,04 Aa	1,38 Bb	1,72	
Média	1,70	1,67		

⁽¹⁾ Gesso agrícola aplicado antes da semeadura. ⁽²⁾ Fósforo aplicado na semeadura na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p=0.05$).

3.5.2.3 Área superficial de raízes de soja

Efeito de interação entre doses de P e doses de gesso para a área superficial de raízes de soja cultivada no LV ocorreu apenas na camada mais profunda amostrada (40–60 cm). Nas camadas mais superficiais (0–10 e 10–20 cm), houve efeito independente dos tratamentos. O gesso proporcionou maior área superficial na profundidade de 0–10 cm, e a adição de P promoveu aumento da área superficial na camada de 10–20 cm. Na camada 20–40 cm, não foi observada influência dos tratamentos na área superficial de raízes de soja. O desdobramento da interação na camada de 40–60 cm revelou aumento na área superficial de raízes com a aplicação de gesso sem P e com a aplicação de P sem gesso. A aplicação do gesso (6 t ha⁻¹) em conjunto com a aplicação de P na semeadura (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) acarretou redução na área superficial de raízes de soja (Tabela 3.10).

Para a soja cultivada no LVA, a análise de variância revelou interação significativa para a área superficial de raízes apenas na camada de 40–60 cm. Nas camadas mais superficiais (0–10 e 10–20 cm), a aplicação de gesso agrícola, independente da adição de P, ocasionou maior área superficial de raízes. Na camada de 0–10 cm, a aplicação de P, independente do gesso, aumentou a área superficial de raízes. Não houve efeito dos tratamentos na área superficial das raízes na camada 20–40 cm. Na camada mais profunda (40–60 cm), o desdobramento da interação revelou aumento na área superficial de raízes com a aplicação de gesso sem P e com a aplicação de P sem gesso. A aplicação de P (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) em conjunto com a aplicação de gesso (6 t ha⁻¹) reduziu a área superficial de raízes de soja (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 – Área superficial ($\text{mm}^2 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de soja após a aplicação de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso		Média	CV (%)
	Sem Gesso	Com 6 t ha ⁻¹⁽¹⁾		
<i>Latossolo Vermelho (LV)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	34,68	69,74	52,20 a	12,1
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	36,50	58,20	47,36 a	
Média	35,59 B	63,17 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	14,60	23,98	19,29 b	35,7
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	34,38	23,53	28,96 a	
Média	24,50 A	23,75 A		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	10,03	9,59	9,82 a	18,1
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	8,45	9,95	9,20 a	
Média	9,24 A	9,78 A		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	7,45 Bb	9,26 Aa	8,35	12,7
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	9,36 Aa	7,85 Bb	8,60	
Média	8,41	8,55		
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	29,71	47,45	38,58 b	27,8
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	44,75	61,15	52,99 a	
Média	37,29 B	54,28 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	8,56	13,77	11,17 b	24,6
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	17,03	11,69	14,37 a	
Média	12,81 A	12,73 A		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	8,74	8,72	8,74 a	25,4
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	9,32	10,13	9,72 a	
Média	9,03 A	9,43 A		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	7,85 Bb	8,50 Aa	8,18	23,0
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	10,51 Aa	8,24 Ba	9,38	
Média	9,18	8,37		

⁽¹⁾ Gesso agrícola aplicado antes da semeadura. ⁽²⁾ Fósforo aplicado na semeadura na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p=0.05$).

3.5.2.4 Diâmetro médio de raízes de soja

O diâmetro médio de raízes de soja não foi influenciado significativamente pela interação entre as doses de P e as doses de gesso, tanto no LV como no LVA. Os tratamentos com P e gesso não ocasionaram alterações significativas no diâmetro de raízes, em todas as camadas amostradas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm) (Tabela 3.11).

3.5.2.5 Densidade de comprimento de raízes de soja

No LV argiloso, os tratamentos não influenciaram a densidade do comprimento das raízes (DCR) na camada mais superficial do solo (0–10 cm). Nas demais camadas de solo (10–20, 20–40 e 40–60 cm) houve interação entre as doses de P e as doses de gesso para essa variável. De maneira geral, o desdobramento dos tratamentos nas referidas camadas, revelou que a DCR de soja foi maior com a aplicação de gesso sem P e com a aplicação de P sem gesso. Além disso, o tratamento com adição de P (90 kg P_2O_5 ha⁻¹) e de gesso (6 t ha⁻¹) ocasionou menor DCR que o tratamento com P (90 kg P_2O_5 ha⁻¹) sem gesso, nas camadas de 10–20 e 40–60 cm (Tabela 3.12).

A DCR de soja cultivada no LVA franco-arenoso foi influenciada pela interação entre os tratamentos nas camadas de solo de 10–20 e 40–60 cm. Efeito isolado da adição de P foi observado na camada mais superficial (0–10 cm), tendo ocorrido maior DCR com a adubação fosfatada. Na camada de 20–40 cm, os tratamentos não influenciaram a DCR. O desdobramento realizado nas camadas de 10–20 e 40–60 cm revelou que a DCR foi maior quando se aplicou apenas o gesso, ou, apenas o P. Na camada de 10–20 cm, a DCR foi menor com a adição conjunta de P (90 kg P_2O_5 ha⁻¹) e de gesso (6 t ha⁻¹). Na camada de 40–60 cm, a DCR foi diminuída quando a adubação fosfatada (90 kg P_2O_5 ha⁻¹) foi realizada no tratamento com gesso (6 t ha⁻¹) (Tabela 3.12).

Tabela 3.11 – Diâmetro médio (mm) de raízes de soja após a aplicação de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso		Média	CV (%)
	Sem Gesso	Com 6 t ha ⁻¹⁽¹⁾		
<i>Latossolo Vermelho (LV)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	1,61	2,00	1,81 a	18,5
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	2,01	1,84	1,93 a	
Média	1,81 A	1,92 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	1,33	1,48	1,41 a	23,6
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	2,01	1,51	1,76 a	
Média	1,67 A	1,50 A		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	1,40	1,75	1,58 a	21,8
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,47	1,74	1,60 a	
Média	1,44 A	1,74 A		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	1,22	1,56	1,39 a	16,7
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,46	1,31	1,39 a	
Média	1,34 A	1,43 A		
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	1,71	1,76	1,73 a	9,4
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,72	1,55	1,63 a	
Média	1,71 A	1,65 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	1,51	1,44	1,47 a	9,5
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,57	1,79	1,68 a	
Média	1,54 A	1,61 A		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	1,51	1,42	1,46 a	13,9
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,45	1,56	1,51 a	
Média	1,48 A	1,49 A		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	1,34	1,31	1,33 a	11,0
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,56	1,45	1,50 a	
Média	1,45 A	1,38 A		

⁽¹⁾ Gesso agrícola aplicado antes da semeadura. ⁽²⁾ Fósforo aplicado na semeadura na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p=0.05).

Tabela 3.12 – Densidade de comprimento (m dm^{-3}) de raízes de soja após a aplicação de fósforo e gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso		Média	CV (%)
	Sem Gesso	Com 6 t ha ⁻¹⁽¹⁾		
<i>Latossolo Vermelho (LV)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	56,1	71,6	63,9 a	17,6
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	61,7	57,1	59,4 a	
Média	58,8 A	64,2 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	17,9 Bb	27,0 Aa	22,5	41,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	45,1 Aa	27,0 Ba	36,1	
Média	31,6	27,0		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	3,5 Bb	9,5 Aa	6,4	18,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	5,6 Aa	7,1 Ab	6,4	
Média	4,4	8,3		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	2,5 Bb	4,2 Aa	3,4	6,3
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	5,0 Aa	3,9 Ba	4,4	
Média	3,9	0,41		
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	61,5	75,0	68,3 b	18,3
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	87,8	91,1	89,5 a	
Média	74,6 A	83,1 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	14,3 Bb	24,9 Aa	19,5	20,3
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	24,9 Aa	16,0 Bb	20,4	
Média	19,7	20,4		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	11,2	11,8	11,5 a	8,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	12,0	10,6	11,3 a	
Média	11,6 A	11,2 A		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	6,6 Ba	10,4 Aa	8,5	17,8
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	7,5 Aa	7,2 Ab	7,4	
Média	7,1	8,8		

⁽¹⁾ Gesso agrícola aplicado antes da semeadura. ⁽²⁾ Fósforo aplicado na semeadura na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p=0.05$).

3.5.2.6 Comprimento radicular total por área

Houve interação significativa entre as doses de P e as doses de gesso para o comprimento radicular por área (CRA) de soja cultivada no LV. A aplicação de gesso, na ausência de P, proporcionou aumento no CRA, e a adição de P, na ausência de gesso, também promoveu aumento no CRA. Destaca-se, entretanto, que a aplicação combinada de gesso (6 t ha⁻¹) em área total sobre a superfície e de P na semeadura (90 kg P₂O₅ ha⁻¹), causou significativa redução no CRA da soja (Figura 3.2a). O CRA médio da soja cultivada no LV, até a profundidade até 60 cm, foi de 113 cm cm⁻², ou 1,13 m cm⁻².

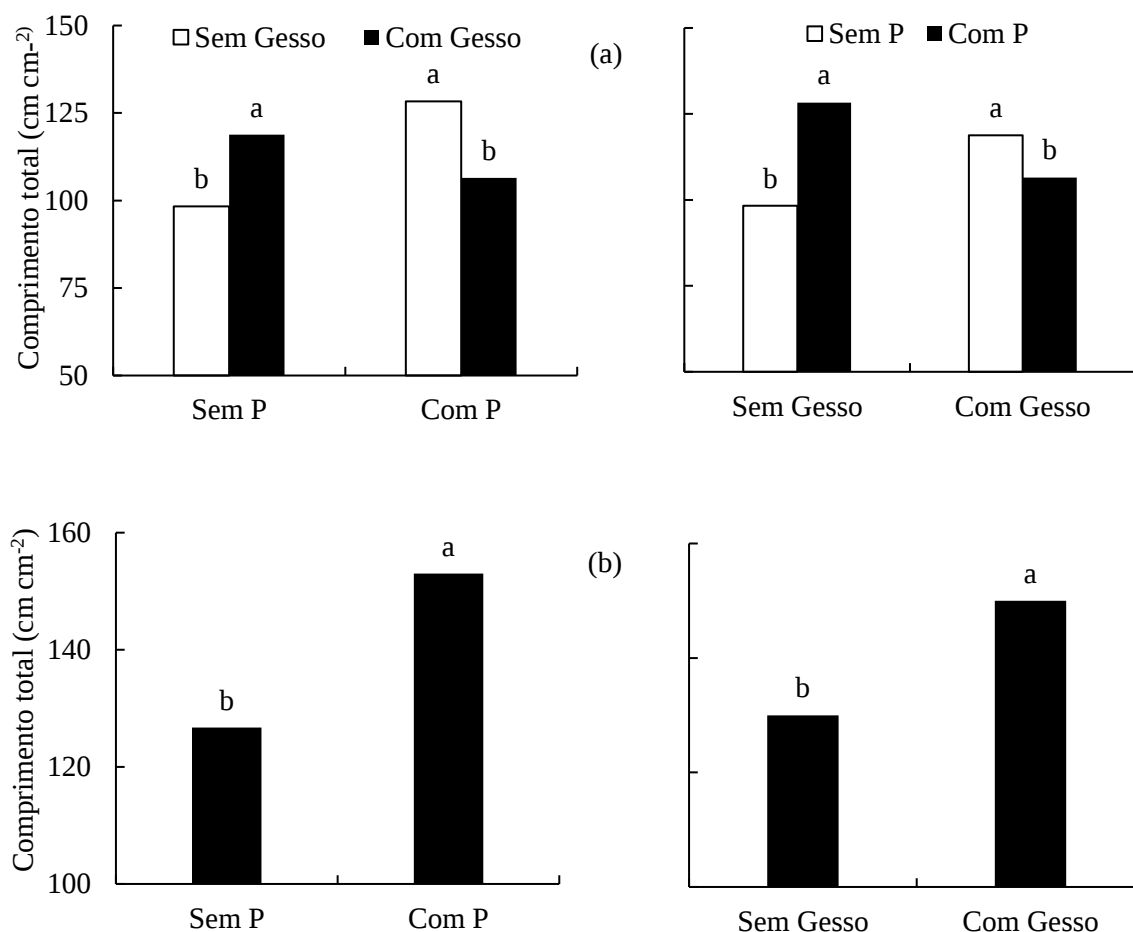


Figura 3.2 – Comprimento radicular por área (cm cm⁻²) de raízes de soja na profundidade de 0–60 cm, após a aplicação de fósforo (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) e gesso agrícola (6 t ha⁻¹) no Latossolo Vermelho argiloso (a) e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa (b). Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

No LVA, o CRA não foi influenciado pela interação entre os tratamentos, tendo ocorrido efeito isolado dos tratamentos com adubação fosfatada e aplicação de gesso. Observou-se que tanto a aplicação de P na semeadura da soja como a aplicação de gesso em área total sobre a superfície, promoveram aumento no CRA da soja (Figura 3.2b). O CRA médio da soja cultivada no LVA, até a profundidade de 60 cm, foi de 140 cm cm^{-2} , ou $1,4 \text{ m cm}^{-2}$, ou seja, 19% maior que o CRA da soja cultivada no LV (Figura 3.2b).

Coeficientes de correlação entre atributos de raízes e atributos químicos do LV e do LVA podem ser observados na Tabela 3.13. Para a soja cultivada no LV, houve correlações negativas entre a DCR e a m% nas camadas amostradas de 0–10 e 20–40 cm. Também observou-se correlações positivas no LV entre a DCR e: (i) o Ca^{2+} e a relação Ca:Mg na camada de 20–40 cm; (ii) o P extraído por Mehlich-1 na camada de 40–60 cm; (iii) o P extraído pela RTA nas camadas mais profundas (20–40 e 40–60 cm); e (iv) o SO_4^{2-} na camada de 20–40 cm. Para a soja cultivada no LVA também ocorreram correlações negativas entre a DCR e a m% nas camadas de 10–20 e 40–60 cm. No LVA, as correlações positivas foram observadas entre a DCR e: (i) o Ca^{2+} e o Mg^{2+} na camada de 40–60 cm, (ii) a relação Ca:Mg nas camadas de 0–10 e 10–20 cm; e (iii) o P extraído tanto por Mehlich-1 quanto pela RTA na camada 0–10 cm.

No LV, o CRA de soja até 60 cm de profundidade foi correlacionado positivamente apenas com o P extraído por RTA. Já no LVA, o CRA de soja correlacionou-se negativamente com a m% e positivamente com a relação Ca:Mg e o P extraído por Mehlich-1 (Tabela 3.13).

Tabela 3.13 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes de soja e atributos químicos do solo em diferentes camadas amostradas no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Camada ----cm----	m%	Ca ²⁺ ----mmol _c dm ⁻³ ----	Mg ²⁺ -----	Ca:Mg	P-Mehlich -----mg dm ⁻³ -----	P-Resina	SO ₄ ²⁻
<i>Latossolo vermelho (LV)</i>							
<i>Densidade de comprimento (m dm⁻³)</i>							
0–10	-0,52*	0,30 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,25 ^{ns}
10–20	-0,23 ^{ns}	0,34 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,15 ^{ns}
20–40	-0,71**	0,74**	0,00 ^{ns}	0,62*	0,36 ^{ns}	0,72**	0,59*
40–60	-0,10 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,62*	0,56*	0,21 ^{ns}
<i>Comprimento radicular por área (cm cm⁻²)</i>							
0–60	-0,28 ^{ns}	0,39 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,65*	0,16 ^{ns}
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)</i>							
<i>Densidade de comprimento (m dm⁻³)</i>							
0–10	0,00 ^c	0,36 ^{ns}	-0,45 ^{ns}	0,59*	0,67*	0,58*	0,38 ^{ns}
10–20	-0,73**	0,27 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,53*	0,12 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,02 ^{ns}
20–40	-0,44 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,07 ^{ns}
40–60	-0,59*	0,64*	0,53*	0,16 ^{ns}	0,44 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	0,37 ^{ns}
<i>Comprimento radicular por área (cm cm⁻²)</i>							
0–60	-0,64*	0,42 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,49*	0,74**	0,44 ^{ns}	0,13 ^{ns}

ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05. c = não foi possível calcular porque a variável (m%) foi constante.

3.5.3 Diagnose nutricional da soja

Não foi observada interação significativa entre as doses de P e as doses de gesso para as concentrações de nutrientes nas folhas de soja cultivada no LV e no LVA (Tabela 3.14). O aumento das doses de P no solo somente influenciou a concentração de Mn no tecido foliar da soja cultivada no LV, cujo efeito ocorreu conforme o modelo quadrático. As concentrações dos demais nutrientes nas folhas de soja, nos dois solos, não foram influenciadas pelas doses de P aplicadas na adubação.

As doses de gesso aplicadas em superfície, tanto no LV quanto no LVA, proporcionaram de forma independente, aumento linear nas concentrações foliares de P, Ca e S na soja (Tabela 3.14). A concentração de Mn nas folhas também foi aumentada de forma linear no LV e de forma quadrática no LVA com o emprego das doses de gesso agrícola. Os teores dos demais nutrientes no tecido foliar da soja não foram alterados com as doses de gesso, em ambos os solos.

Tabela 3.14 – Concentrações de nutrientes nas folhas de soja após a aplicação de doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Vermelho-Amarelo-textura-fineza-arenosa:										
Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----g kg ⁻¹ -----						-----mg kg ⁻¹ -----			
Latossolo Vermelho (LV)										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	38,3	3,0	27,5	8,5	3,0	2,1	13,4	141	49,1	43,3
30	38,0	3,2	28,1	9,2	3,2	2,0	13,4	146	56,1	44,8
60	39,3	3,4	29,7	8,6	2,9	1,9	13,5	145	54,2	44,2
90	37,7	3,2	28,9	8,7	3,1	1,9	13,5	140	52,3	42,1
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	Q*	ns
CV (%)	16,3	12,9	12,3	13,0	5,4	14,5	9,2	11,1	7,2	12,1
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	38,9	3,0	28,1	8,7	3,1	1,8	13,2	145	46,4	43,1
2	37,5	3,1	29,3	8,8	3,1	2,0	13,4	143	52,1	43,6
4	37,5	3,2	29,0	8,9	2,9	2,1	13,5	146	52,1	44,5
6	39,3	3,4	27,9	9,4	3,1	2,3	13,7	139	59,4	43,3
Efeito	ns	L**	ns	L*	ns	L**	ns	ns	L**	ns
CV (%)	16,3	11,3	10,1	9,1	8,3	18,4	7,1	7,3	10,1	9,2
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	52,4	3,6	29,1	7,0	4,0	2,0	8,9	295	81,8	27,1
30	53,0	3,8	26,1	7,3	4,3	1,9	9,4	298	78,8	28,9
60	48,4	3,9	27,5	7,1	4,2	1,9	9,2	317	81,1	24,9
90	47,5	3,8	25,9	6,5	4,0	1,9	9,1	288	76,6	25,3
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	13,8	9,0	11,7	17,4	27,8	13,1	25,1	21,7	15,3	23,8
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	48,8	3,4	28,3	6,2	4,2	1,7	9,0	305	76,8	26,8
2	49,4	3,8	27,0	6,8	4,3	1,9	9,2	290	83,2	26,3
4	51,6	3,9	26,9	7,5	3,9	2,0	9,4	307	81,4	26,0
6	51,4	3,9	26,3	7,5	4,0	2,1	9,0	296	77,0	27,2
Efeito	ns	L**	ns	L**	ns	L**	ns	ns	Q*	ns
CV (%)	11,7	8,4	9,5	15,3	22,9	13,5	14,5	10,0	10,1	14,9

L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo.

**p<0.01, *p<0.05.

3.5.4 Extração e exportação de nutrientes pela soja

A análise de variância para a extração de nutrientes na soja não mostrou interação significativa entre as doses de P e gesso aplicadas no LV argiloso e no LVA franco-arenoso. No LV, as doses de P aumentaram de forma quadrática as extrações de K, Mg, S, Fe e Mn pela soja, enquanto que no LVA, as doses de P refletiram em aumento quadrático apenas as extrações de Mg e S (Tabela 3.15). As doses de gesso agrícola aumentaram de forma quadrática a extração de P, e de forma linear, as extrações de Ca, S e Fe pela soja no LV. Já, no LVA, as doses de gesso aumentaram de forma linear apenas as extrações de Ca e S. Nota-se que a extração de Mg pela soja foi significativamente reduzida, de forma linear, com o aumento das doses de gesso, em ambos os solos estudados (Tabela 3.15).

A exportação de P pelos grãos de soja cultivada nos dois solos (LV e LVA) foi influenciada significativamente pela interação entre as doses de P e as doses de gesso. A exportação dos demais nutrientes pelos grãos não foi influenciada pela interação entre os tratamentos. No LV, as doses de P proporcionaram aumento quadrático nas exportações de P, K, Fe, Mn e Zn pelos grãos de soja. Já, no LVA, o incremento nas doses de P aumentou de forma linear as exportações de N e K e, de forma quadrática, as exportações de P e Zn pelos grãos de soja. As doses de gesso agrícola no LV proporcionaram aumento linear nas exportações de P, Ca, S e Fe pelos grãos de soja, e quadrático nas exportações de Mn e Zn. De forma similar ao ocorrido no LV, as doses de gesso aplicadas no LVA aumentaram linearmente a exportação de S e, de forma quadrática, a de Mn e Zn. Destaca-se que, em ambos os solos, houve redução linear significativa na exportação de Mg pelos grãos de soja com as doses de gesso aplicadas (Tabela 3.16).

As equações de regressão obtidas para a extração e a exportação de nutrientes pela cultura da soja nos dois solos (LV e LVA), considerando os efeitos independentes das doses de P e das doses de gesso, encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 3.17 e 3.18.

Tabela 3.15 – Extração de nutrientes pela cultura da soja após a aplicação das doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----kg ha ⁻¹ -----						-----g ha ⁻¹ -----			
Latossolo Vermelho (LV)										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	333	40,4	397	82,8	47,0	24,1	122	2.238	485	308
30	320	41,6	395	80,0	43,7	24,3	119	3.678	488	295
60	351	43,4	450	89,0	50,4	25,5	132	3.502	513	325
90	303	42,5	363	78,6	40,5	22,3	111	2.581	401	272
Efeito	ns	ns	Q*	ns	Q*	Q*	ns	Q*	Q*	ns
CV (%)	18,8	19,9	15,0	14,8	9,7	27,0	15,7	38,3	14,0	14,8
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	344	37,9	411	75,2	48,2	15,0	125	2.636	461	295
2	315	37,3	376	83,1	44,8	23,2	117	2.446	453	289
4	312	48,0	396	84,7	42,6	26,5	118	2.859	474	299
6	336	44,7	421	87,4	42,0	31,4	125	3.057	478	316
Efeito	ns	Q*	ns	L*	L*	L**	ns	L*	ns	ns
CV (%)	17,4	19,1	18,4	15,0	16,3	26,3	16,7	21,5	16,4	16,1
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	327	32,8	297	70,9	37,0	16,3	134	2.509	585	398
30	395	35,4	339	74,5	40,8	21,4	188	3.343	635	455
60	310	29,9	267	70,0	38,2	15,1	106	2.326	499	308
90	292	29,7	259	69,0	33,9	15,9	128	2.272	503	323
Efeito	ns	ns	ns	ns	Q*	Q*	ns	ns	ns	ns
CV (%)	18,9	19,1	15,5	32,4	25,4	22,8	38,8	35,8	39,3	42,4
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	341	31,6	300	67,1	40,1	14,0	141	2.651	531	367
2	333	32,1	288	67,4	37,5	16,2	136	2.578	578	385
4	331	32,4	290	73,4	37,2	17,9	139	2.533	578	355
6	320	31,6	284	76,1	35,2	20,6	140	2.689	535	371
Efeito	ns	ns	ns	L*	L*	L**	ns	ns	ns	ns
CV (%)	16,1	22,6	15,5	19,1	23,8	21,7	18,7	39,8	19,8	22,2

L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo.

**p<0.01, *p<0.05.

Tabela 3.16 – Exportação de nutrientes pelos grãos de soja após a aplicação de doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----kg ha ⁻¹ -----						-----g ha ⁻¹ -----			
Latossolo Vermelho (LV)										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	205	23,4	79,8	9,2	9,5	8,7	60,3	510	118	165
30	206	24,2	90,3	9,6	9,8	9,5	61,9	636	122	169
60	221	25,9	91,7	9,3	9,9	9,9	65,4	809	126	176
90	198	21,5	83,8	9,2	9,2	8,6	59,9	637	107	159
Efeito	ns	Q**	Q*	ns	ns	ns	ns	Q*	Q**	Q*
CV (%)	14,7	9,2	14,3	8,3	11,2	20,4	7,9	33,8	6,9	7,6
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	210	22,8	85,4	8,3	10,2	7,6	61,4	598	112	158
2	207	23,6	85,2	9,1	9,7	9,7	62,8	598	120	169
4	208	24,3	90,1	9,9	9,6	9,8	62,4	697	125	174
6	205	24,3	85,0	9,8	8,9	9,7	60,7	699	115	167
Efeito	ns	L*	ns	L**	L*	L**	ns	L*	Q*	Q**
CV (%)	11,5	10,0	11,2	12,3	12,6	11,5	9,6	25,5	10,3	8,3
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	178	16,2	78,5	10,7	12,9	8,1	26,0	351	92,1	76,4
30	202	19,7	91,5	11,8	13,9	9,1	37,1	459	100,3	88,5
60	209	20,2	90,0	12,0	13,0	8,9	26,0	409	98,4	77,7
90	220	19,5	91,6	9,7	10,6	8,8	31,3	396	98,8	74,3
Efeito	L**	Q**	L*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	Q*
CV (%)	11,1	6,3	14,8	30,7	27,7	13,3	32,1	37,1	29,5	30,9
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	207	18,2	88,2	10,8	13,6	8,3	28,7	396	91,3	75,5
2	206	19,5	91,8	11,3	13,3	8,6	31,8	428	106,4	87,7
4	204	19,7	87,4	11,5	12,9	8,8	31,0	397	103,1	78,1
6	192	18,3	83,6	10,5	10,6	9,2	28,9	393	88,7	75,7
Efeito	ns	ns	ns	ns	L*	L*	ns	ns	Q**	Q*
CV (%)	11,2	9,1	8,7	15,9	21,8	8,6	12,8	29,7	12,9	18,7

L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo.

**p<0.01, *p<0.05.

Tabela 3.17 – Equações de regressão ajustadas para extração e exportação de nutrientes pela soja cultivada no Latossolo Vermelho argiloso (LV) e no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura franco arenosa, considerando a aplicação de doses de fósforo na semeadura.

Nutriente	Solo	Regressão para Extração	R ²	Regressão para Exportação	R ²
N (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = \bar{y} = 327$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 208$	-
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 331$	-	$\hat{y} = 182 + 0,443x$	0,93
P (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = \bar{y} = 42$	-	$\hat{y} = 23,0 + 0,12x - 0,0014x^2$	0,76
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 32$	-	$\hat{y} = 16,3 + 0,14x - 0,0012x^2$	0,98
K (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = 387 + 1,97x - 0,024x^2$	0,49	$\hat{y} = 80 + 0,51x - 0,0051x^2$	1,00
	LVA	$\hat{y} = 306 + 0,63x - 0,014x^2$	0,60	$\hat{y} = 82 + 0,126x$	0,60
Ca (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = \bar{y} = 83$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 9,3$	-
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 61$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 11$	-
Mg (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = 46 + 0,12x - 0,0018x^2$	0,35	$\hat{y} = \bar{y} = 9,6$	-
	LVA	$\hat{y} = 37 + 0,16x - 0,0023x^2$	0,96	$\hat{y} = \bar{y} = 13$	-
S (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = 24 + 0,071x - 0,0009x^2$	0,72	$\hat{y} = \bar{y} = 9,2$	-
	LVA	$\hat{y} = 17 + 0,083x - 0,0012x^2$	0,30	$\hat{y} = \bar{y} = 8,7$	-
Cu (g ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = \bar{y} = 121$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 62$	-
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 139$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 30$	-
Fe (g ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = 2282 + 62x - 0,656x^2$	0,97	$\hat{y} = 490 + 9,3x - 0,083x^2$	0,83
	LVA	$\hat{y} = 2650 + 16x - 0,247x^2$	0,47	$\hat{y} = \bar{y} = 404$	-
Mn (g ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = 477 + 2,1x - 0,0319x^2$	0,82	$\hat{y} = 117 + 0,48x - 0,0064x^2$	0,87
	LVA	$\hat{y} = 601 - 0,12x - 0,013x^2$	0,60	$\hat{y} = \bar{y} = 97$	-
Zn (g ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = \bar{y} = 300$	-	$\hat{y} = 164 + 0,49x - 0,0058x^2$	0,76
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 371$	-	$\hat{y} = 78 + 0,33x - 0,0043x^2$	0,62

Tabela 3.18 – Equações de regressão ajustadas para extração e exportação de nutrientes pela soja cultivada no Latossolo Vermelho argiloso (LV) e no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura franco arenosa, considerando a aplicação de doses de gesso.

Nutriente	Solo	Regressão para Extração	R ²	Regressão para Exportação	R ²
N (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = \bar{y} = 327$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 208$	-
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 331$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 202$	-
P (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = 37+2,6x-0,169^2$	0,61	$\hat{y} = 23+0,26x$	0,88
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 32$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 19$	-
K (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = \bar{y} = 401$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 86$	-
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 291$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 88$	-
Ca (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = 76,9+1,91x$	0,89	$\hat{y} = 8,5+0,265x$	0,82
	LVA	$\hat{y} = 66+1,65x$	0,91	$\hat{y} = \bar{y} = 11$	-
Mg (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = 47,5-1,04x$	0,92	$\hat{y} = 10,2-0,20x$	0,93
	LVA	$\hat{y} = 39,8-0,75x$	0,93	$\hat{y} = 14,0-0,47x$	0,79
S (kg ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = 16,1+2,6x$	0,97	$\hat{y} = 8,2+0,32x$	0,60
	LVA	$\hat{y} = 13,9+1,08x$	0,99	$\hat{y} = 8,3+0,15x$	0,98
Cu (g ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = \bar{y} = 121$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 62$	-
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 139$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 30$	-
Fe (g ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = 2498+83,8x$	0,66	$\hat{y} = 588+20,1x$	0,81
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 2613$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 404$	-
Mn (g ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = \bar{y} = 467$	-	$\hat{y} = 111+7,5x-1,13x^2$	0,93
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 556$	-	$\hat{y} = 92+10,5x-1,84x^2$	0,99
Zn (g ha ⁻¹)	LV	$\hat{y} = \bar{y} = 300$	-	$\hat{y} = 158+8,4x-1,13x^2$	0,99
	LVA	$\hat{y} = \bar{y} = 371$	-	$\hat{y} = 77+5,0x-0,913x^2$	0,58

Em se tratando da interação entre as doses de P e as doses de gesso para a exportação de P pelos grãos de soja (Tabela 3.19), nota-se que no LV, o aumento das doses de P na semeadura, na ausência de gesso e na dose de 4 t ha⁻¹ de gesso, aumentou linearmente a exportação de P pelos grãos de soja. Na dose de 2 t ha⁻¹ de gesso, não foi observado efeito significativo das doses de P na exportação do nutriente. No entanto, na maior dose de gesso (6 t ha⁻¹), o incremento nas doses de P ocasionou redução linear do P exportado pelos grãos de soja (Tabela 3.19). Por outro lado, as doses de gesso ocasionaram aumento na exportação de P pelos grãos, de forma quadrática na ausência de adubação com P, e linear nas doses de 30 kg

ha⁻¹ e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Porém, o aumento das doses de gesso ocasionou redução na exportação de P pelos grãos de soja na maior dose de P (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) (Tabela 3.19).

Tabela 3.19 – Desdobramento da interação para a exportação de P nos grãos (kg ha⁻¹) de soja, após a aplicação das doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso (t ha ⁻¹)				Efeito	R ²
	0	2	4	6		
<i>Latossolo Vermelho (LV)</i>						
0	19,4	24,9	27,0	22,4	Q**	0,98
30	22,6	24,1	23,9	26,4	L*	0,84
60	24,6	24,0	25,9	28,9	L*	0,99
90	24,6	21,5	20,4	19,5	L*	0,98
Efeito	L**	ns	L**	L**		
R ²	1,00	-	0,68	0,87		
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)</i>						
0	14,3	16,2	18,3	16,1	Q*	0,87
30	17,8	19,1	21,4	20,6	L*	0,74
60	20,2	20,7	20,4	19,7	ns	-
90	20,7	21,9	18,9	16,7	L**	0,72
Efeito	L**	L**	Q*	Q**		
R ²	0,91	0,95	0,89	0,97		

L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo.

**p<0.01, *p<0.05.

No LVA, o aumento nas doses de P, na ausência de gesso e na dose de 2 t ha⁻¹, aumentou de forma linear a exportação de P pelos grãos de soja (Tabela 3.19). Nas doses mais elevadas de gesso (4 e 6 t ha⁻¹), o incremento das doses de P na semeadura da soja proporcionou aumento quadrático na exportação de P pelos grãos. Por outro lado, o acréscimo das doses de gesso, na ausência de adição de P, aumentou de forma quadrática o P exportado pelos grãos, e na dose de 30 kg P₂O₅ ha⁻¹, aumentou a exportação de P de forma linear. As doses de gesso não alteraram a exportação de P pelos grãos de soja, na dose de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹. Entretanto, também ocorreu redução linear na exportação de P pelos grãos de soja com as doses de gesso na maior dose de P (90 kg P₂O₅ ha⁻¹), de forma similar com o que ocorreu no LV.

3.5.5 Produção de massa seca e rendimento de grãos de soja

A produção de massa seca (MS) da parte aérea de soja nos dois solos (LV e LVA) não foi influenciada pela interação entre as doses de P e as doses de gesso (Figura 3.3a,b). As doses de P promoveram aumento quadrático na produção de MS da soja cultivada no LV e no LVA. A máxima produção de MS no LV (13.431 kg ha⁻¹) seria obtida com a aplicação de 38 kg P₂O₅ ha⁻¹, e no LVA (11.947 kg ha⁻¹) com a dose de 29 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Figura 3.3a). Todavia, não foi observada influência significativa das doses de gesso agrícola na produção de MS da parte aérea da soja, em ambos os solos (Figura 3.3a,b).

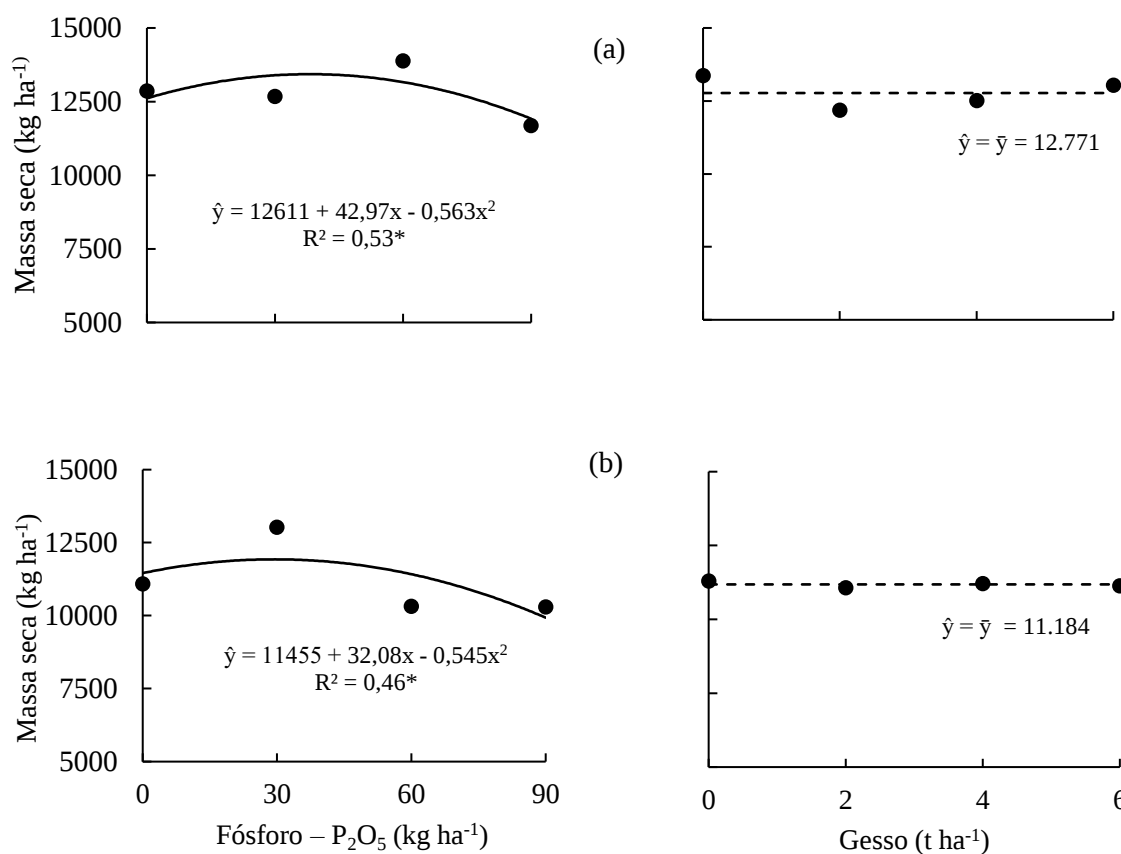


Figura 3.3 – Produção de massa seca da parte aérea da soja após a aplicação de doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso (a) e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa (b). (●) = Efeitos médios dos tratamentos. *p<0.05.

Para o rendimento de grãos, interação significativa entre os tratamentos foi observada apenas para a soja cultivada no LV (Figura 3.4a). No LVA, houve efeito independente das doses de P e de gesso (Figura 3.4b).

O desdobramento da interação para a soja cultivada no LV revelou que na ausência de gesso e na dose de 2 t ha⁻¹ de gesso, o aumento nas doses de P não influenciou o rendimento de grãos. Porém, nas maiores doses de gesso (4 e 6 t ha⁻¹), o acréscimo nas doses de P ocasionou aumento quadrático no rendimento de grãos de soja. Derivando-se as equações de regressão, observou-se que, na dose de 4 t ha⁻¹ de gesso, o rendimento máximo, de 4.155 kg ha⁻¹ de grãos, seria obtido com a dose de 31 kg P₂O₅ ha⁻¹. Já, na dose de 6 t ha⁻¹ de gesso, o rendimento máximo, de 4.199 kg ha⁻¹ de grãos, seria obtido com a dose de 47 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Figura 3.4a).

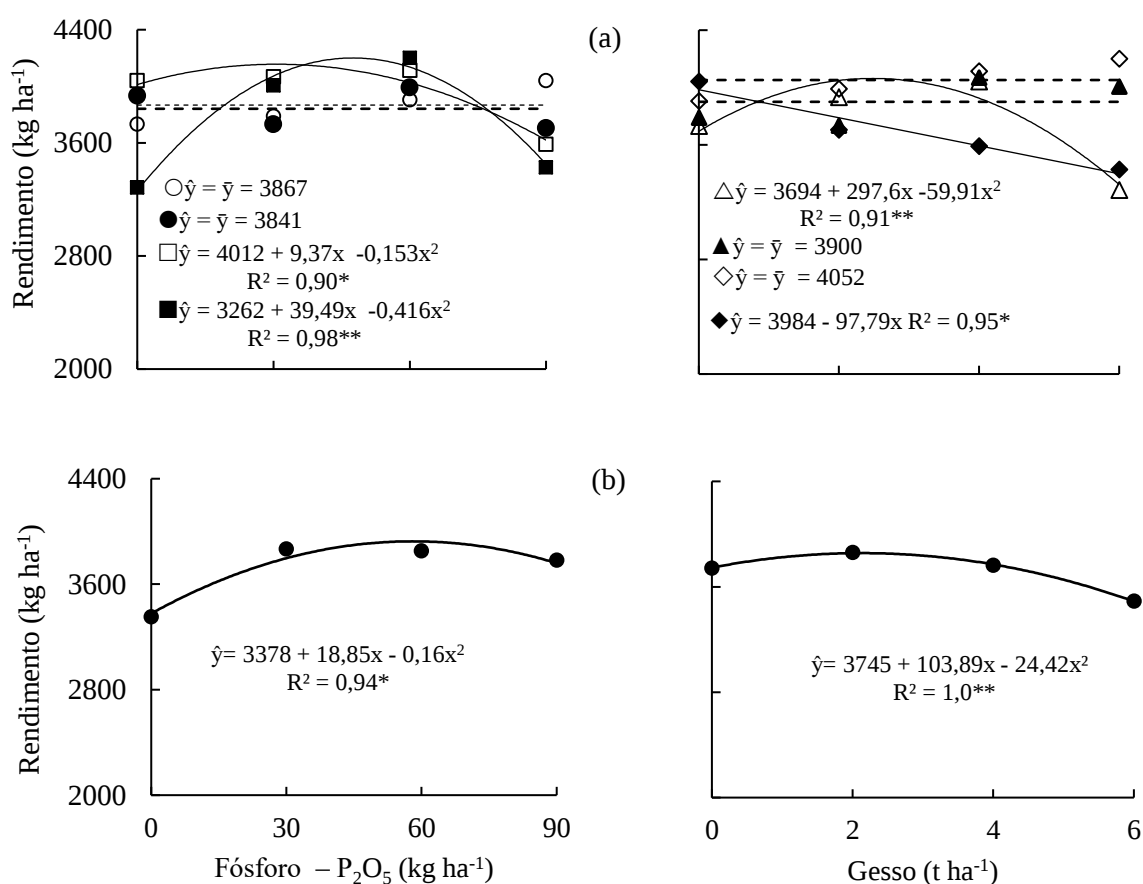


Figura 3.4 – Rendimento de grãos de soja após a aplicação de doses de fósforo (△0, ▲30, ◇60 e ◆90 kg ha⁻¹) e de gesso agrícola (○0, ●2, □4 e ■6 t ha⁻¹) no Latossolo Vermelho argiloso (a) e no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura franco-arenosa (b). (●) = Efeitos médios dos tratamentos no LVA. $^{**}p < 0.01$ e $^*p < 0.05$.

Considerando-se o aumento das doses de gesso no LV, na ausência de P houve aumento quadrático no rendimento de grãos. Neste caso, derivando-se a equação, o rendimento máximo de grãos (4.064 kg ha⁻¹) seria obtido com a dose de 2,5 t ha⁻¹ de gesso. Já, nas doses

de 30 e 60 kg P_2O_5 ha^{-1} , o acréscimo das doses gesso agrícola não alterou o rendimento de grãos, tendo-se obtido rendimento médio de 3.900 kg ha^{-1} de grãos com 30 kg P_2O_5 ha^{-1} e de 4.052 kg ha^{-1} de grãos com 60 kg P_2O_5 ha^{-1} . Todavia, na maior dose de P (90 kg P_2O_5 ha^{-1}), o aumento das doses de gesso acarretou em significativa redução linear no rendimento de grãos de soja (Figura 3.4a). Na ausência de gesso, o rendimento de soja foi de 3.984 kg ha^{-1} .

No LVA, as doses de P e as doses de gesso, de maneira independente, ocasionaram aumento quadrático no rendimento de grãos de soja. De acordo com as equações de regressão ajustadas, o maior rendimento de grãos com a adubação fosfatada (3.926 kg ha^{-1}) seria obtido com a aplicação de 58 kg P_2O_5 ha^{-1} na semeadura, e com a aplicação de gesso (3.931 kg ha^{-1}) na dose de 2,1 t ha^{-1} (Figura 3.4b).

As correlações entre o rendimento de grãos de soja e a extração de nutrientes pela cultura foram baixas e não significativas. Correlações significativas foram obtidas entre o rendimento de grãos e todos os nutrientes exportados pelos grãos de soja cultivada no LV. Para soja cultivada em LVA franco-arenoso, observou-se que as correlações foram significativas entre o rendimento e a exportação de N, P, K e S (Tabela 3.20).

Tabela 3.20 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre o rendimento de grãos e a exportação de nutrientes pela soja cultivada no Latossolo Vermelho (LV) argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura franco-arenosa.

Soja	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
<i>Rendimento de grãos (kg ha^{-1})</i>										
LV	0,71**	0,76**	0,68**	0,54**	0,73**	0,51**	0,80**	0,34*	0,73**	0,81**
LVA	0,83**	0,82**	0,87**	0,20 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,58**	0,10 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,14 ^{ns}

ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

Correlações positivas também foram observadas entre o rendimento de grãos de soja e a DCR, em ambos os solos estudados (LV e LVA). Para a soja cultivada no LV, observou-se correlações significativas nas camadas amostradas de 0–10, 10–20 e 40–60 cm, e para a soja cultivada no LVA, apenas na camada mais superficial do solo (0–10 cm). O CRA (0–60 cm), também se correlacionou positivamente com o rendimento de grãos de soja cultivada tanto no LV quanto no LVA (Tabela 3.21).

Tabela 3.21 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes e rendimento de grãos de soja em diferentes camadas do Latossolo Vermelho (LV) argiloso e do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura franco-arenosa.

Camada ----cm----	Rendimento de grãos de soja (LV) -----kg ha ⁻¹ -----	Rendimento de grãos de soja (LVA) -----kg ha ⁻¹ -----
<i>Densidade de comprimento (m dm⁻³)</i>		
0–10	0,47*	0,62*
10–20	0,49*	0,26 ^{ns}
20–40	0,17 ^{ns}	0,01 ^{ns}
40–60	0,63**	0,04 ^{ns}
<i>Comprimento radicular por área (cm cm⁻²)</i>		
0–60	0,49*	0,61*

ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

3.5.6 Eficiências de aproveitamento do fósforo pela soja

Não houve interação entre as doses de P e as doses de gesso para as eficiências de aproveitamento de P pela soja. Na Tabela 3.22 estão apresentados os efeitos médios dos tratamentos sobre as eficiências de aproveitamento de P pela soja cultivada nos dois solos (LV e LVA). Em ambos os solos, a eficiência agrônômica (EA), que leva em consideração o aumento de produtividade em função da dose de P aplicada, foi reduzida com a aplicação da maior dose de P (90 kg P₂O₅ ha⁻¹). Todavia, o incremento nas doses de gesso aumentou linearmente a EA do P para a soja cultivada no LV, e de forma quadrática, para a soja cultivada no LVA [$\hat{y} = 14,0 + 1,47x - 0,35x^2$; R² = 0,99]. De acordo com a equação ajustada, a máxima EA, de 15,5 kg kg⁻¹, seria obtida com a aplicação de 2,1 t ha⁻¹ de gesso no LVA.

A quantidade de P acumulada e a produção de MS da parte aérea da soja permitiram determinar a eficiência fisiológica (EF) dos tratamentos. Observa-se que no LV, a máxima EF foi obtida com a aplicação de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ na semeadura da soja. Além disso, para esse solo, houve significativa redução na EF com o incremento das doses de gesso. Para a soja cultivada no LVA, não houve respostas significativas da EF aos tratamentos.

A eficiência agrofisiológica (EAF) não foi influenciada pelos tratamentos para a soja cultivada no LV, e foi significativamente reduzida no LVA com a aplicação de 90 kg P₂O₅ ha⁻¹. Em ambos os solos, a EAF não foi alterada pela aplicação de gesso agrícola. Isso significa que as doses de gesso agrícola não modificaram o ganho na produtividade dos grãos de soja em relação ao aumento de P acumulado na MS da parte aérea.

A eficiência na recuperação aparente (ERA), que considera a quantidade de P acumulada na MS em relação à dose de P aplicada, decresceu na medida em que se

aumentaram as doses de P, tanto no LV quanto no LVA, apresentando a menor ERA com a aplicação de 90 kg P_2O_5 ha⁻¹. No entanto, em ambos os solos, as doses de gesso não interferiram na ERA.

Tabela 3.22 – Eficiências de aproveitamento de fósforo pela cultura da soja em função de doses de fósforo e de gesso agrícola no Latossolo Vermelho argiloso e no Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa.

Tratamento	EA	EF	EAF	ERA	FPP	EUP
-----kg kg ⁻¹ -----						
<i>Latossolo Vermelho (LV)</i>						
Fósforo – P_2O_5 (kg ha ⁻¹)						
30	6,6 a	77,6 b	12,5 a	0,70 a	130,0 a	65,44 a
60	5,5 a	135,3 a	14,5 a	0,37 b	67,5 b	50,3 a
90	1,8 b	42,3 b	14,2 a	0,19 b	41,0 c	11,5 b
DMS	4,8	48,9	17,4	0,19	5,2	33,8
Gesso (t ha ⁻¹)						
0	3,0	135,3	13,7	0,50	78,7	76,3
2	2,7	80,3	10,3	0,30	77,4	29,8
4	6,3	61,4	16,4	0,40	81,4	25,0
6	6,5	63,2	14,6	0,46	80,6	38,5
Efeito	L*	L**	ns	ns	ns	ns
R ²	0,75	0,77	-	-	-	-
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)</i>						
Fósforo – P_2O_5 (kg ha ⁻¹)						
30	22,6 a	315,4 a	29,5 a	0,18 a	129,0 a	96,0 a
60	11,0 a	300,4 a	20,6 a	0,01 b	64,2 b	23,6 b
90	6,8 b	268,6 a	12,8 b	0,00 b	42,0 c	20,8 b
DMS	5,9	250,1	7,1	0,1	7,6	53,4
Gesso (t ha ⁻¹)						
0	13,9	331,6	22,5	0,07	78,9	58,2
2	15,6	276,8	21,0	0,06	80,6	35,4
4	14,2	408,6	26,6	0,07	79,0	52,4
6	10,2	162,2	13,8	0,04	75,1	41,2
Efeito	Q*	ns	ns	ns	Q*	ns
R ²	0,99	-	-	-	0,99	-

EA = eficiência agrônômica; EF = eficiência fisiológica; EAF = eficiência agrofisiológica; ERA = eficiência na recuperação aparente; FPP = Fator parcial de produtividade; EUP = eficiência de uso do fósforo. L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo. *p<0.05. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

O fator parcial de produtividade (FPP), calculado pela relação entre o rendimento de grãos numa determinada dose de P, mostrou respostas similares à aplicação de P no LV e no LVA. Em ambos os solos, a máxima dose de P (90 kg P_2O_5 ha⁻¹) foi a que causou o menor

FPP, seguida da dose de 60 kg P_2O_5 ha⁻¹. A redução do FPP foi de 48% no LV e 50% no LVA, com o aumento da dose de P de 30 para 60 kg P_2O_5 ha⁻¹, e de mais 39% no LV e 35% no LVA, quando a dose de P foi aumentada de 60 para 90 kg P_2O_5 ha⁻¹. As doses de gesso agrícola não influenciaram o FPP no LV, mas aumentaram-no de forma quadrática [$\hat{y} = 79,0 + 1,42x - 0,35x^2$; $R^2 = 0,99$] no LVA. Derivando-se a equação, tem-se que a dose de 2 t ha⁻¹ de gesso proporcionaria o máximo FPP, de 80,4 kg kg⁻¹.

A eficiência de utilização do P (EUP) foi significativamente menor na dose de 90 kg P_2O_5 ha⁻¹ para a soja cultivada no LV. Já, no LVA, as maiores doses de P (60 e 90 kg P_2O_5 ha⁻¹), demonstraram a menor EUP pela soja. Não houve efeito significativo das doses de gesso na EUP pela soja cultivada no LV e no LVA.

3.6 DISCUSSÃO

3.6.1 Alterações nos solos com a adubação fosfatada

De maneira geral, a aplicação de P ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) na semeadura da soja promoveu efeitos similares nos atributos químicos do solo, em ambas as áreas estudadas (LV e LVA). Aumentos nos teores de P no solo com o acréscimo nas doses de fertilizante fosfatado eram esperados, principalmente em camadas mais superficiais (Tabelas 3.2 e 3.5). Em SPD, diversos estudos têm relatado uma distribuição estratificada das formas lábeis de P, ocorrendo maiores teores do nutriente nas camadas de 0–5 cm (PAVINATO et al., 2009) e 0–10 cm (SELLES et al., 1997; SOUZA et al., 2012). O aumento no P disponível nas camadas superficiais do solo sob SPD é devido à ausência de revolvimento, à decomposição de resíduos de culturas antecessoras e à aplicação de fertilizantes fosfatados (SELLES et al., 1997).

Aumentos nos teores de P disponível no solo em função de doses do fertilizante fosfato também foram observados por Rosolem & Marcello (1998), Corrêa et al. (2004) e Machado et al. (2012). Esse resultado se justifica pela capacidade de adsorção de P diminuir com o aumento da concentração deste elemento no solo (NOVAIS & SMYTH, 1999). O aumento do grau de saturação dos sítios de adsorção com um dado nutriente diminui sua energia de ligação com o solo, favorecendo seu deslocamento para a solução do solo (ERNANI, 2016).

É válido destacar que o aumento de P nas camadas superficiais do solo foi detectado pelo extrator de Mehlich-1 e também pela RTA. Porém, nas camadas mais profundas, a partir de 20 cm, apenas o extrator de Mehlich-1 acusou maiores teores de P no solo. Esses resultados ratificam a grande dificuldade da análise de P em solos. O extrator de Mehlich-1 baseia-se em uma solução ácida ($0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ de H_2SO_4 e $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ de HCl) que é mais eficaz na dissolução de P ligado a Ca, extraindo pequena proporção de P ligado a Fe e Al. Já, o método da RTA apresenta características peculiares na extração de P, tendo propriedades que permitem a avaliação do P-lábil (RAIJ, 2011).

Em ambas as áreas, observou-se que a disponibilidade de SO_4^{2-} aumentou com as doses de P (Tabelas 3.2 e 3.5). Os ânions fosfato e sulfato são retidos, em geral, com maior energia que os ânions NO_3^- e Cl^- . Contudo, a adsorção de fosfato pelos colóides do solo é específica e relativamente bem compreendida na literatura (NOVAES & SMYTH, 1999). Para o SO_4^{2-} , no entanto, os mecanismos de ligação aos colóides do solo ainda não estão bem esclarecidos, pois, dependendo das condições do solo, este íon pode se comportar de diversas maneiras.

Existem muitos fatores que influenciam a adsorção de SO_4^{2-} nos solos, incluindo o conteúdo e natureza da matéria orgânica, o pH, a presença de outros íons e, principalmente, a composição mineralógica (ALVES & LAVORENTI, 2004). Sposito (1989) verificou que o SO_4^{2-} é adsorvido aos colóides por mecanismo de complexação de esfera externa, e Casagrande et al. (2003) concluíram que os mecanismos de adsorção de SO_4^{2-} pelos solos não devem ser os mesmos que o fosfato, pois em sua pesquisa, a adsorção de SO_4^{2-} nem sempre diminuiu com a elevação do pH. Todavia, de acordo com Raij (2011), em solos com predominância de cargas negativas, o SO_4^{2-} tende a ser pouco retido, sendo facilmente movimentado para maiores profundidades. Em solos com maiores teores de óxidos de Fe e Al, o sulfato tende a ficar adsorvido por troca iônica, com comportamento de íon indiferente. Logo, através dos resultados obtidos neste estudo, e de acordo com Alvarez et al. (2007), pode-se inferir que houve deslocamento do SO_4^{2-} pelos ânions fosfatos (gerados pela dissociação do fertilizante fosfatado no solo), havendo repulsão dos ânions SO_4^{2-} para as camadas mais profundas.

3.6.2 Alterações nos solos com a aplicação de gesso agrícola

Efeitos positivos da adição do gesso agrícola (de maneira independente) na redução da acidez trocável do solo (Al^{3+}) em subsuperfície foram observados em ambos os solos (Tabelas 3.3 e 3.6). Em solos brasileiros, a recomendação para aplicação de gesso tem sido feita quando o teor de Ca^{2+} encontra-se abaixo de $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o teor de Al^{3+} encontra-se acima de $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou a saturação por Al encontra-se acima de 20% (SOUZA & LOBATO, 2002), nas profundidades de 20–40 ou 30–50 cm (CAIRES et al., 2016). No presente estudo, tanto o LV quanto o LVA continham teores de Ca^{2+} maiores que $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, mas apresentavam teores de Al maiores que $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e saturação por Al acima de 20%, na profundidade de 20–40 cm.

Os aumentos de Ca^{2+} trocável e de SO_4^{2-} com a aplicação de gesso foram evidentes nos dois solos estudados, assim como a movimentação de Mg^{2+} e K^+ para camadas subsuperficiais (Tabelas 3.3 e 3.6). Resultados similares têm sido observados com frequência na literatura, sendo atribuídos à formação de pares iônicos entre os cátions e o ânion SO_4^{2-} , pela ação da dissociação do Ca advindo do gesso (CAIRES et al., 2003; 2011a,b; 2016; RAMPIM et al., 2011; ZANDONÁ et al., 2015). Destaca-se que, embora a forma de MgSO_4^0 seja prioritária sobre outros pares iônicos (ZAMBROSI et al., 2007b), no presente estudo ficou evidenciada a movimentação do K^+ para camadas subsuperficiais em ambos os solos, especialmente no solo de textura franco-arenosa. Isso também pode ter sido favorecido pelas altas doses de K_2O

(100 kg ha⁻¹) aplicadas na superfície do solo em todos os tratamentos. De acordo com Dalla Nora et al. (2013), a movimentação vertical de cátions no perfil do solo pode ser benéfica à nutrição das plantas, desde que o teor crítico para a cultura seja mantido na camada superficial. As alterações ocorridas nos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ em função da aplicação de gesso refletiram no aumento da relação Ca:Mg do solo. Caires et al. (2011a) também obtiveram aumento linear da relação Ca:Mg até a profundidade de 60 cm, com as doses de gesso aplicadas.

Os incrementos nos teores de Ca²⁺ e SO₄²⁻ em profundidade, devido ao gesso, estão relacionados com a movimentação do Ca²⁺, a qual é influenciada pela infiltração de água no solo, e pela ligação com o ânion SO₄²⁻ que permite a movimentação de ambos os elementos até a subsuperfície (RAMPIM et al., 2011; RAMPIM & LANA, 2015). De acordo com Tiecher et al. (2012), solos com baixos teores de MO e de argila são os que têm apresentado as maiores probabilidades de resposta à aplicação de S-SO₄²⁻. Entretanto, neste trabalho, os efeitos na camada de 20–40 cm, por exemplo, foram mais pronunciados no solo argiloso que no franco-arenoso, ou seja, no LV argiloso, o aumento nos teores de SO₄²⁻ no subsolo, com a máxima dose de gesso (6 t ha⁻¹), foi de 80%, enquanto que no LVA foi de 70%.

Incrementos de P no solo com a aplicação de gesso foram observados pelo extrator de Mehlich-1 em todas as profundidades avaliadas (até 60 cm de profundidade). Já, o método da RTA detectou aumentos de P até 20 cm no solo argiloso (LV) e até 40 cm no solo franco-arenoso (LVA) (Tabelas 3.3 e 3.6). Caires et al. (2003), avaliando os efeitos do gesso nas características químicas de um LV argiloso, constataram que a adição de gesso (até 9,0 t ha⁻¹) promoveu maiores teores de P (Mehlich-1) nas camadas de 0–5 cm, e Caires et al (2011b), em outro estudo em LV argiloso, detectaram aumentos de P (Mehlich-1) na camada de 0–10 cm, com a adição de até 12 t ha⁻¹ de gesso. Rampim et al. (2013) observaram aumentos do P (Mehlich-1) em camadas até 40 cm, com a aplicação de 5,0 t ha⁻¹ de gesso agrícola em LV muito argiloso. No presente estudo, é importante salientar que a RTA detectou aumentos de P até a camada de 40 cm no LVA (franco-arenoso) com a aplicação de gesso, mas não detectou este mesmo efeito com a aplicação do fertilizante fosfatado. O gesso utilizado continha altos teores de P₂O₅ como impureza em sua constituição (17 g kg⁻¹), o que pode ter influenciado no aumento de P em camadas subsuperficiais. Desta forma, parece ter ocorrido alguma movimentação pelo perfil do solo do P contido no gesso, provavelmente devido à formação de fosfato de cálcio. Zambrosi et al. (2007a), avaliando a especiação iônica da solução do solo em amostras de um LV argiloso, cinco anos após a aplicação de 3, 6 e 9 t ha⁻¹ de gesso agrícola, detectaram intensa associação do P com cátions, inclusive formação de espécies de

$\text{Ca-H}_x\text{PO}_4^x$ até a profundidade de 40 cm. Dalla Nora & Amado (2013), estudando a aplicação de doses de gesso (até $6,5 \text{ t ha}^{-1}$) na qualidade química do solo para o sistema radicular de soja e milho, observaram que a maior dose utilizada ocasionou aumentos nos teores de P no solo de até 93,1% na camada amostrada de 15–25 cm, e de até 65,7% na camada de 25–40 cm. Os autores atribuíram esses efeitos à melhoria na distribuição do sistema radicular das culturas e ao aumento da infiltração de água no solo com a melhoria na agregação do solo proporcionada pelo gesso. Todavia, os autores relataram que não foi possível isolar efetivamente as causas desse processo.

3.6.3 Alterações nos solos ocasionadas pela interação entre fósforo e gesso

A maior dose de gesso (6 t ha^{-1}) em conjunto com a maior dose de P ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) promoveu redução nos teores de Ca^{2+} com consequente aumento na saturação por Al na camada superficial do solo argiloso (LV), e também em subsuperfície do solo de textura média (LVA) (Tabelas 3.4 e 3.7). Rampim et al. (2013), avaliando o uso do gesso nos teores de P e S disponível, Al^{3+} e a interferência no valor do P remanescente no solo, verificaram resultados semelhantes em um LV textura muito argilosa. Os autores constataram que em doses de gesso superiores a $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ houve aumento do Al^{3+} em camadas de 0–10, 10–20 e 20–40 cm. Ernani et al. (2001) verificaram que a adição de gesso agrícola em dois tipos de solo (até 12 t ha^{-1} em um Cambissolo Háplico e até $9,2 \text{ t ha}^{-1}$ em um Latossolo Bruno), independentemente do modo de aplicação, diminuiu o pH e aumentou a concentração de Al^{3+} da solução percolada e da fase sólida. Os autores atribuíram esses fatores à possível hidrólise do Al, deslocado das cargas negativas pelo Ca aplicado em excesso, e também pelo aumento da concentração de eletrólitos, uma vez que os solos estudados tinham predomínio de carga líquida negativa. Sarmento et al. (2001), avaliando respostas da alfafa a fontes de P associadas ao gesso e à calagem, verificaram que a aplicação de SFT apresentou redução no pH do solo. Contudo, esses autores atribuíram tal efeito à dissociação do CO_2 liberado pela respiração das raízes e nódulos da alfafa.

De acordo com Ernani (2016), após a adição de um dado cátion no solo, há aumento da sua atividade na solução do solo, ocorrendo deslocamento do equilíbrio para a fase sólida. Sendo assim, quando um fertilizante ou sal é adicionado em grandes quantidades no solo, parte dos cátions pré-existentes na camada elétrica difusa é deslocada para a solução do solo pelo cátion que entrou no sistema. Além disso, o poder tampão de um cátion é afetado pela CTC e pelo seu coeficiente de seletividade. Oliveira et al. (2002) observaram aumento no

coeficiente de seletividade entre Ca e Al com o acréscimo de doses de gesso (até 12 t ha⁻¹) em um Cambissolo ácido. A seletividade de Ca e Al na maior dose foi de 3,13, enquanto que a seletividade do Mg e Al foi de 0,053 e, a de K e Al de 0,0001.

Segundo Havlin et al. (2014), há também a possibilidade da acidificação do meio pela dissolução inicial do fertilizante que produz H₃PO₄ em volta do grânulo, reduzindo o pH a 1,5. Consequentemente, quando ocorre dissociação do H₃PO₄, há aumento na concentração de cátions em volta do grânulo, neutralizando rapidamente a reação. Em poucos dias, há precipitação da reação formando fosfatos de cálcio (fosfato bicálcico).

Neste estudo, a formação de fosfato de cálcio no solo também pode ter sido favorecida devido à aplicação das altas doses de P e de gesso, embora o pH do solo não tenha apresentado condições adequadas para tal reação – solos com pH_{água} acima de 6,0 (RAIJ, 2011). Desta forma, é possível que a precipitação do P com o Ca, tenha resultado na redução nos teores de Ca²⁺, com consequente aumento na m%.

3.6.4 Alterações nos atributos radiculares da soja

O crescimento espacial do sistema radicular determina a habilidade da planta em explorar recursos do solo. Um sistema radicular eficiente é aquele que otimiza a relação entre a quantidade de recursos adquiridos e empregados para sua obtenção, sendo a arquitetura do sistema fundamental para a aquisição de recursos disponíveis no solo (RICHARDSON et al., 2011). De acordo com Lambers et al. (2006), a massa seca de raízes representa o estoque total de matéria subterrânea alocada, sendo o conteúdo de reserva das plantas; o volume radicular representa o volume de solo explorado pelas raízes; a área superficial reflete no contato das raízes com o solo e na absorção de água e nutrientes do solo; o diâmetro seria um indicador das condições químicas e físicas do solo; e o comprimento radicular além de determinar o potencial de absorção de água e nutrientes, é um indicador das interações das raízes com microrganismos do solo.

Isoladamente, foi possível observar neste estudo os efeitos benéficos do P e do gesso agrícola na melhoria do sistema radicular da soja, principalmente nas camadas superficiais (0–10 e 10–20 cm) dos solos argiloso e franco-arenoso. Efeitos na melhoria do sistema radicular pela adição de gesso agrícola no solo têm sido atribuídos ao aumento na concentração de Ca²⁺, da formação de espécies menos tóxicas de Al (AlSO₄⁺) e da precipitação de Al³⁺ (CAIRES et al., 2002; 2011b; 2016; FAGERIA & MOREIRA, 2011; SUMNER et al., 1986). O Ca é um nutriente com papel preponderante no crescimento radicular das plantas. Quando a

saturação por Ca no complexo de troca é inferior a 20%, há forte limitação no crescimento das raízes no solo, na maioria das espécies cultivadas (QUAGGIO, 2000). Segundo esse autor, a absorção de Ca ocorre apenas nas partes mais novas, ainda não suberizadas das raízes, havendo assim necessidade de absorção contínua desse nutriente para assegurar o desenvolvimento do sistema radicular, o que implica que o Ca deve estar distribuído adequadamente no solo.

O P apresenta baixa mobilidade no solo, e a resposta do sistema radicular à presença deste nutriente tende a ser específica, tal como a proliferação de raízes em sítios onde ocorre maior disponibilidade do P. Teoricamente, na presença do nutriente, a planta envia sinais gerando as modificações características com objetivo de aumentar a absorção (SILVA & DELATTORRE, 2009). A movimentação do P no solo ocorre principalmente por difusão, sendo de poucos centímetros por ano, lentamente na direção das áreas de depleção ao redor da raiz. Há, portanto, necessidade do P estar localizado próximo ao sistema radicular para ser captado e absorvido (LAMBERS et al., 2006). Isso explica a maior concentração de raízes nas camadas mais superficiais do solo. Além disso, Li et al. (2017), verificaram maior concentração de raízes de soja nos primeiros 10 cm em SPD (cerca de 44%), quando comparado ao sistema convencional de preparo do solo (cerca de 24%). Neste estudo, ficou evidente que a disponibilidade de P influenciou positivamente o crescimento radicular total da soja, sendo detectadas correlações positivas dessa variável com o P (RTA) no LV e o P (Mehlich-1) no LVA (Tabela 3.13).

Neste estudo, as médias na densidade de comprimento e no comprimento radicular por área foram maiores para a soja cultivada no solo de textura franco-arenosa (LVA) quando comparadas com as do solo argiloso (LV). Rosolem et al. (1999), estudando os efeitos das interações água $\times$ textura do solo $\times$ resistência à penetração sobre o crescimento de raízes de milho, concluíram que solos argilosos (410 a 480 g kg⁻¹ de argila) têm maior resistência à penetração e, conseqüentemente, os de textura arenosa (220 g kg⁻¹ de argila) apresentam maior crescimento radicular. A estrutura física, assim como a textura do solo, exerce influência direta sobre o crescimento das raízes. Em solos argilosos, as raízes normalmente se concentram mais no horizonte superficial, enquanto que em solos de textura média a arenosa, as raízes tendem à maior extensão vertical (FAGERIA & MOREIRA, 2011).

Crusciol et al. (2005) verificaram efeitos positivos no sistema radicular em quatro cultivares de soja em função da adição de fertilizante fosfatado em um LV com baixos teores de P. Corrêa et al. (2004), avaliando a dinâmica do P no desenvolvimento da soja em um LV textura franco-arenosa, verificaram que o sistema radicular da soja respondeu positivamente a

doses de 50 e 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅, até 15 e 30 cm de profundidade, respectivamente, em solo com deficiência de P. No presente estudo, ambos os solos continham altos teores de P na camada de 0–20 cm e, mesmo assim, as raízes de soja demonstraram melhores respostas à adição de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (independentemente do gesso) nas camadas superficiais.

Resultados negativos no desenvolvimento radicular da soja em função do uso concomitante de alta dose de gesso agrícola (6 t ha⁻¹) e fertilizante fosfatado (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) foram constatados, principalmente para a densidade de comprimento em camadas subsuperficiais, em ambas as áreas (Tabela 3.12). De forma análoga a esse estudo, efeitos negativos da interação entre a adição excessiva de Ca, através da calagem, e P têm sido reportados na literatura.

Martini & Mutters (1989) verificaram em seu estudo que o fornecimento de Ca, através de calagem excessiva, inibiu o crescimento radicular e causou deficiência de P. Estudando a interação calagem × adubação fosfatada em soja, Rosolem & Marcello (1998) verificaram que ocorreu aumento na superfície radicular de soja em função do fornecimento de Ca (através da calagem) somente nos tratamentos que não receberam P. Neste estudo, a fonte de P utilizada também foi o SFT, que contém Ca, e segundo os autores, foi suficiente para promover o crescimento radicular. Esses autores sugerem a possibilidade da formação de fosfato de cálcio no solo, mas Rosolem & Marcello (1998) justificaram que esta inferência não encontrou apoio nos resultados de análise do solo de seus experimentos.

Salienta-se que, no presente estudo, a redução no crescimento radicular certamente está ligada ao fato de que as maiores doses de gesso e P promoveram redução nos teores de Ca²⁺ e, em consequência disso, aumentaram a m%, nas camadas de 0–10 cm do LV e de 40–60 cm do LVA. Além disso, as correlações para a densidade de comprimento nessas camadas mostraram claramente a influência negativa da m% no crescimento radicular (Tabela 3.13). De acordo com Oliveira et al. (2009), as baixas concentrações de Ca²⁺ associadas às altas concentrações de Al³⁺ e à alta saturação por Al³⁺ no subsolo são os principais impedimentos ao crescimento radicular em Latossolos distróficos.

Segundo Neumann & Römheld (2012), a cultura da soja ao fixar N₂ deixa de absorver NO₃⁻, acidificando o solo, apresentando rizosfera com pH mais baixo. Além disso, a absorção de cátions pelas raízes pode causar deslocamento de cargas positivas (H⁺) para espaço extracelular, causando a acidificação do meio e aumentando a solubilidade do Al. Destaca-se que a soja é considerada uma cultura “calcícola” (alta demanda de Ca) e também tende a absorver cátions bivalentes com mais facilidade, quando comparada com as gramíneas (FERNANDES & SOUZA, 2006; CAIRES et al., 2011b). Entretanto, nesse estudo, parece

que o aumento da m% em função das maiores doses de P e de gesso ocorreu mais em consequência da redução dos teores de Ca^{2+} , provavelmente ocasionada pela precipitação do P com o Ca.

O excesso do P no solo, proveniente da adição do gesso em conjunto com o fertilizante fosfatado também pode ser uma explicação para o menor crescimento radicular nesses tratamentos. Diversos autores têm demonstrado que altos teores de P podem inibir o crescimento de raízes, principalmente quando o fornecimento de P é realizado em condições de altos níveis de P disponível (BALIGAR et al., 1998; FAGERIA & MOREIRA, 2011; LYNCH & BROWN, 2008). Rosolem & Marcello (1998) demonstraram que $8,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de P no solo seria mais do que suficiente para o crescimento radicular de soja.

3.6.5 Alterações nos atributos das plantas de soja

As doses de P pouco influenciaram as concentrações de macro e micronutrientes nas folhas de soja, enquanto as doses de gesso promoveram diversas alterações (Tabela 3.14). Aumentos de Ca, S e P nos tecidos foliares da soja cultivada no LV e no LVA foram detectados com a aplicação de gesso agrícola, devido à presença destes nutrientes em sua constituição e ao aumento desses nutrientes nos solos. O aumento de Mn nas folhas de soja verificado em ambas as áreas também foi observado por Caires et al. (2003), os quais atribuíram esse efeito à formação de par iônico entre o Mn e o SO_4^{2-} , o que reduziu a atividade do elemento na solução, favorecendo a liberação de mais íons Mn, permitindo maior absorção pelas plantas. Salienta-se, entretanto, que os teores de nutrientes nas folhas, neste estudo, estiveram dentro das faixas consideradas adequadas para a cultura da soja (PAULETTI, 2004): (i) $40\text{--}55 \text{ g kg}^{-1}$ para N, (ii) $2,5\text{--}5,0 \text{ g kg}^{-1}$ para P, (iii) $17\text{--}25 \text{ g kg}^{-1}$ para K, (iv) $3,6\text{--}20 \text{ g kg}^{-1}$ para Ca, (v) $2,6\text{--}10 \text{ g kg}^{-1}$ para Mg, (vi) $2,1\text{--}4,0 \text{ g kg}^{-1}$ para S, (vii) $10\text{--}30 \text{ mg kg}^{-1}$ para Cu, (viii) $20\text{--}100 \text{ mg kg}^{-1}$ para Mn, (ix) $50\text{--}350 \text{ mg kg}^{-1}$ para Fe e (x) $20\text{--}50 \text{ mg kg}^{-1}$ para Zn.

As extrações de K, Mg, S, Fe e Mn pela soja cultivada no LV, e de Mg e S pela soja cultivada no LVA responderam de maneira quadrática às doses de P (Tabela 3.15), seguindo a mesma tendência ocorrida para a produção de MS (Figura 3.3). A produção máxima de MS da parte aérea da soja cultivada no LV ocorreu com a aplicação de $38 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, e para a soja cultivada no LVA, com $29 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. Isso significa que doses de P muito elevadas afetaram a produção de MS, bem como a extração de nutrientes pela cultura. Destaca-se que os teores iniciais de P no solo, antes da instalação dos experimentos, estavam acima do nível

crítico, em ambas as áreas (Tabela 3.1) (OLEYNIK et al., 1998) e, por isso, as respostas das culturas foram mais limitadas ao aumento de P no solo (VIEIRA et al., 2015).

Embora a produção de MS da parte aérea da soja, em ambos os solos, não tenha sido influenciada pelo gesso (Figura 3.3), notou-se expressivas alterações nas extrações de Ca, S e Mg (Tabela 3.15). O incremento na absorção de Ca e S pela soja com a aplicação de gesso também foi observado em outros estudos (CAIRES et al., 2003; 2011a,b; RAMPIM et al., 2011; ZANDONÁ et al., 2015), justamente pelo fato de uma tonelada de gesso fornecer 227 kg de Ca e 181 kg de S-SO₄²⁻. Porém, observou-se que na maior dose de gesso (6 t ha⁻¹), a soja cultivada no LV argiloso absorveu 109% mais SO₄²⁻ em relação ao tratamento sem gesso, enquanto que no LVA textura franco-arenosa esse aumento na absorção de SO₄²⁻ foi de apenas 47%. Isso pode estar relacionado ao fato de os efeitos do gesso no aumento dos teores de SO₄²⁻ no solo terem sido mais pronunciados no LV em relação ao LVA.

Aumentos na extração de P com a aplicação de gesso no LV (Tabela 3.15) também podem ser atribuídos à composição do gesso, o qual forneceu 17 kg de P₂O₅ por tonelada aplicada. Considerando a extração média, a soja cultivada no LV extraiu 24% mais P em relação à soja cultivada no LVA. Por outro lado, a redução na extração de Mg pela soja, em ambos os solos, com a aplicação de gesso, deixa claro que a movimentação de Mg²⁺ das camadas superficiais para o subsolo proporcionada pelo uso de gesso afeta a absorção desse nutriente pela cultura da soja. A extração de Mg pela soja, em ambos os solos (LV e LVA), foi 12% menor quando o gesso foi aplicado na maior dose (6 t ha⁻¹) em comparação ao tratamento sem gesso.

No LVA, a exportação de N aumentou com as doses de P pelo fato desses nutrientes interagirem de forma sinérgica (Tabela 3.16). Além disso, a soja é uma planta que apresenta alto requerimento de N nos grãos para formação de proteínas, e o P tem participação essencial no metabolismo do N. De acordo com Araújo & Machado (2006), a absorção de NO₃⁻ e o processo de fixação biológica (redução do N₂) são processos ativos que requerem energia metabólica, necessitando, portanto, de ATP (que é formado através do P).

Os efeitos do gesso no aumento de SO₄²⁻ no solo também ficaram evidenciados no aumento da exportação de S e redução na exportação do Mg pelos grãos de soja cultivada em ambas as áreas. Porém, vale ressaltar que o aumento na exportação de P e Ca com as doses de gesso ocorreu apenas no LV (Tabela 3.16). Isso pode estar relacionado ao fato de o aumento na extração de P também ter sido detectada apenas nesse solo, sendo a média, inclusive, 24% maior que no LVA, e também porque a média de extração de Ca foi 14% maior no LV do que no LVA. O Ca é um elemento praticamente imóvel na planta. O aumento no teor de Ca na

solução do solo normalmente ocasiona aumento na concentração de Ca nas folhas (CAIRES, 2003; 2011b; RAMPIM et al., 2011), mas não necessariamente em órgãos de armazenamento, como frutos e grãos.

Os aumentos na extração de Fe e nas exportações de Fe, Mn e Zn em função dos tratamentos (Tabelas 3.15 e 3.16) podem ter sido ocasionados pelo fornecimento desses nutrientes, na forma de impureza, os quais podem estar presentes em quantidades significativas tanto no SFT quanto no gesso (CARVALHO et al., 2012). De acordo com esses autores, o SFT e o gesso agrícola podem apresentar, respectivamente: 43 e 26 mg kg⁻¹ de Zn, 30 e 19 mg kg⁻¹ de Cu, 717 e 2.347 mg kg⁻¹ de Fe, e 21 e 76 mg kg⁻¹ de Mn.

O que chama atenção neste trabalho é o fato de a exportação de P pelos grãos ter sido negativamente afetada, em ambas as áreas, quando as maiores doses de gesso (6 t ha⁻¹) e de P (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) foram utilizadas em conjunto no solo (Tabela 3.19). Esse resultado também pode estar ligado à provável precipitação do P com o Ca decorrente das maiores doses de P e de gesso agrícola utilizadas em conjunto e, também, ao consequente aumento na m% verificada nas camadas de 0–10 cm no LV e 40–60 cm no LVA. Com o aumento da m% pode ter ocorrido precipitação nas raízes do P com o Al³⁺ livre no solo, restringindo a translocação do nutriente para a parte aérea (SILVA & DELATTORRE, 2009). Além disso, o Mg atua como carregador de P na planta e, desta forma, com a redução na extração do Mg com as maiores doses de gesso (Tabela 3.15), a translocação do P também pode ter sido prejudicada (HAWKESFORD et al., 2012).

3.6.6 Produtividade e eficiência de aproveitamento de fósforo pela soja

O rendimento de grãos de soja cultivada em ambos os solos foi influenciado pela densidade de comprimento de raízes, principalmente na camada de 0–10 cm, e pelo comprimento radicular por área (até 60 cm) (Tabela 3.21). Isso ficou bastante claro para a soja cultivada no LV, tendo-se observado que, na dose de 90 kg P₂O₅ ha⁻¹, o acréscimo nas doses de gesso reduziu linearmente a produtividade da cultura (Figura 3.4). Ou seja, como a densidade de comprimento e o comprimento radicular por área foram reduzidos com as maiores doses de P e de gesso, isso refletiu diretamente no rendimento de grãos.

A movimentação de Mg²⁺ das camadas superficiais para o subsolo, em ambos os solos, também pode ter afetado o rendimento de grãos da cultura na maior dose de gesso (6 t ha⁻¹). Quando a relação Ca:Mg torna-se muito alta, a planta tende a absorver menos Mg e, para a soja, a redução desse nutriente pode afetar a fixação biológica do N, pois o Mg tem relação

direta com a fotossíntese e a síntese de ATP na fosforilação oxidativa no interior do nódulo (HAWKESFORD et al., 2012).

As médias de rendimento de grãos foram de 3.848 e 3.715 kg ha⁻¹ para a soja cultivada no LV e no LVA, respectivamente. Tais médias estiveram acima da média de rendimento de grãos obtida na safra 2013–14 no Estado do Paraná, a qual foi de 2.950 kg ha⁻¹ (CONAB, 2015). De modo geral, independentemente das doses de P, foi possível observar que a soja respondeu à aplicação de gesso agrícola até as doses de 2,4 e 2,1 t ha⁻¹ no LV e no LVA, respectivamente. Zandoná et al. (2015), estudando a aplicação de gesso em um LV muito argiloso do Rio Grande do Sul, observaram aumento no rendimento de grãos de soja com a aplicação de 2,0 t ha⁻¹ de gesso agrícola, obtendo produtividade de 3.200 kg ha⁻¹. Pauletti et al. (2014) verificaram aumento de 960 kg ha⁻¹ de grãos de soja com o emprego de 6 t ha⁻¹ de gesso agrícola em um Latossolo Vermelho-Amarelo franco-arenoso do Paraná. Costa & Crusciol (2016) obtiveram incremento na produtividade da cultura da soja quando foram adicionados 2,1 t ha⁻¹ gesso em conjunto com 2,0 t ha⁻¹ de calcário em um LV franco-arenoso do Estado de São Paulo.

É importante destacar que nos meses de outubro a dezembro de 2013, a precipitação pluvial esteve abaixo da média histórica da região (Figura 3.1). Por isso, a tendência de resposta das culturas aos tratamentos foi maior, principalmente à aplicação de gesso. Em outros estudos também foram observadas respostas da soja à aplicação de gesso em condições de limitação de chuvas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura (PAULETTI et al., 2014, ZANDONÁ et al., 2015). Todavia, alguns estudos destacam que em condições de distribuição regular de chuvas durante o ciclo da cultura, não há respostas da soja à aplicação de gesso (CAIRES et al., 1999; 2003; 2006a; 2011b). A resposta da soja à aplicação de gesso parece ser dependente da precipitação pluvial que ocorre durante o ciclo de desenvolvimento da cultura no campo.

Gonçalves Junior et al. (2010) obtiveram resposta linear da soja às doses de P, alcançando produtividade de soja de 3.839 kg ha⁻¹ com a dose de 160 kg P₂O₅ ha⁻¹ em um Argissolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa com teor adequado de P (Mehlich-1) na camada 0–20 cm (14 mg dm⁻³). Araújo et al. (2005) também encontraram respostas positivas da soja, com rendimento médio de 2.902 kg ha⁻¹ até a dose de 270 kg P₂O₅ ha⁻¹. Todavia, destaca-se que esses autores realizaram o estudo em um Latossolo Amarelo textura franco-arenosa contendo teor baixo de P (Mehlich-1) na camada 0–20 cm (4,4 mg dm⁻³), o que justifica a resposta linear da soja com a utilização de elevadas doses de P. Por sua vez, Alcântara Neto et al. (2010) encontraram resposta quadrática na produtividade da soja,

obtendo máximo rendimento de grãos de 2.614 kg ha⁻¹ com a aplicação de 95 kg P₂O₅ ha⁻¹, também em solo com baixo teor de P.

Vieira et al. (2015) desenvolveram um trabalho para avaliar as respostas de culturais anuais à adubação fosfatada em três Latossolos com diferentes teores de P disponível no solo. Foram 44 experimentos instalados nesses solos, com teores de P (Mehlich-1) variando entre 1,2 e 18,6 mg dm⁻³ na camada 0–20 cm. De maneira geral, os autores observaram respostas quadráticas da soja ao aumento de doses de P (até 240 kg P₂O₅ ha⁻¹), principalmente em solos com teores de P variando de médio a alto. Concluiu-se que os incrementos na produtividade ocorrem em menor magnitude nesses solos, principalmente naqueles em que o SPD esteja estabelecido há mais tempo. Em solos com teores de P considerados muito altos (18,6 mg dm⁻³), os autores observaram redução linear no rendimento de grãos de soja com o incremento das doses de P.

No presente estudo, os teores de P (Mehlich-1) na camada 0–20 cm foram considerados altos, em ambas as áreas estudadas (Tabela 3.1). Fato esse que também acabou refletindo nas eficiências de aproveitamento do P pela soja nas maiores doses de P aplicadas (Tabela 3.22). De acordo com a lei dos incrementos decrescentes, as aplicações de nutrientes correspondem a aumentos cada vez menores de produto (RAIJ, 2011). Deste modo, as eficiências, de um modo geral, tenderam a ser maiores para as menores doses de fertilizante fosfatado aplicado, pois o P recuperado pela planta geralmente decresce com o aumento de P no solo. Sempre que a EUP não for igual ou superior a 100%, há acúmulo do nutriente no solo. Desta forma, adubações fosfatadas acima do necessário têm sido frequentes nos sistemas produtivos brasileiros, principalmente em SPD (VIEIRA et al., 2015).

Embora a aplicação de gesso não tenha influenciado a EUP, o incremento nas doses de gesso aumentou a EA do P pela soja cultivada no LV, e a EA e o FPP, até aproximadamente a dose de 2,0 t ha⁻¹ de gesso, no LVA. De acordo com Syers et al. (2008) e Manschadi et al. (2014), a EUP geralmente é menor que 45 kg kg⁻¹. Os valores de EUP obtidos neste estudo estiveram próximos desse valor, os quais foram, em média, de 42 kg kg⁻¹ para a soja cultivada no LV e de 47 kg kg⁻¹ para a soja cultivada no LVA.

Em nosso estudo observou-se que a aplicação de gesso na superfície do solo pode proporcionar economia com a adubação fosfatada e manter elevado teto de rendimento de grãos de soja (acima de 4 t ha⁻¹). Isso foi constatado no solo argiloso (LV) em que houve interação significativa entre as doses de P e as doses de gesso no rendimento de grãos da cultura. Nesse caso, a produtividade de soja sem aplicação de P e com 2,5 t ha⁻¹ de gesso (4.064 kg ha⁻¹) foi semelhante àquelas obtidas com a aplicação de 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ (3.900 kg

ha⁻¹), 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ (4.052 kg ha⁻¹) e 90 kg P₂O₅ ha⁻¹ (3.894 kg ha⁻¹), sem aplicação de gesso. No caso do LVA textura franco-arenosa, o rendimento de grãos ocorreu de forma independente da interação, tendo-se obtido maior produtividade de soja com a aplicação de 58 kg P₂O₅ ha⁻¹ e 2,1 t ha⁻¹ de gesso.

3.7 CONCLUSÕES

1. A aplicação de gesso agrícola em superfície não altera a eficiência de uso de fósforo (EUP) pela soja em experimento de curto prazo, mas proporciona aumento na eficiência agrônômica (EA) do fósforo. Além disso, o gesso agrícola proporciona economia com a adubação fosfatada, especialmente em solo com maior teor de argila.

2. A utilização de gesso agrícola em superfície bem como a aplicação de fósforo na semeadura ocasiona, de maneira independente, melhoria nos atributos radiculares da soja cultivada em solo argiloso e de textura franco-arenosa.

3. O emprego de dose excessiva de gesso agrícola sobre a superfície em conjunto com elevada dose de fósforo na semeadura, em solo com alto teor de fósforo, prejudica o crescimento radicular da soja e afeta negativamente o rendimento de grãos da cultura.

4. O crescimento radicular da soja é influenciado pela disponibilidade de fósforo no solo e interfere diretamente no rendimento de grãos da cultura. Por isso, deve-se adequar as doses de gesso e do fertilizante fosfatado, em conformidade com o teor de fósforo disponível no solo, para que os efeitos da aplicação de gesso e da adubação fosfatada sejam benéficos à cultura da soja.

3.8 REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA NETO, F.; GRAVINA, G. A.; SOUZA, N. O. S.; BEZERRA, A. A. C. Adubação fosfatada na cultura da soja na microrregião do Alto Médio Gurguéia. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, v.41, p.266-271, 2010.
- ALVAREZ, V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, H. K.; PEREIRA, F. P. Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. P.596-635.
- ALVES, M. E.; LAVORENTI, A. Sulfate adsorption and its relationships with properties of representative soils of the São Paulo State, Brazil. **Geoderma**, v.118, p.89-99, 2004.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. **Mercado de fertilizantes: Janeiro a julho de 2016**. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/estatistica/comentarios.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2016.
- ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p.253-280.
- ARAÚJO, W. F.; SAMPAIO, R. A.; MEDEIROS, R. D. Resposta de cultivares de soja à adubação fosfatada. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, p.129-134, 2005.
- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N. K.; ELRASHIDI, M. Toxicity and nutriente constraints on root growth. **Hort. Science**, v.33, p.960-965, 1998.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas no solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.275-286, 2003.
- CAIRES, E. F.; CHURKA, S.; GARBUIO, F. J.; FERRARI, R. A.; MORGANO, M. A. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. **Scientia Agricola**, v. 63, p.370-379, 2006a.
- CAIRES, E. F.; CORRÊA, J. C. L.; CHURKA, S.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. **Scientia Agricola**, v.63, p.502-509, 2006b.
- CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, v.59, p.357-364, 2002.
- CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.315-327, 1999.
- CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v.27, p.45-53, 2011a.

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

CAIRES, E. F.; ZARDO FILHO, R.; BARTH, G.; JORIS, H. A. W. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO₃-N in Subsoil. **Pedosphere**, v.26, p.474-485, 2016.

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

CARVALHO, V. G. B.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M. Potencial de Fertilizantes e corretivos no aporte de micronutrientes ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.931-938, 2012.

CASAGRANDE, J.C.; ALLEONI, L.R.F.; CAMARGO, O.A.; BORGES, M. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27: 51-59, 2003.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Setembro 2015**. Brasília: CONAB, v.2, 2015. 134p. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_09_11_10_42_03_boletim_graos_setembro_2015.pdf>. Acesso em: 29 set. 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Agosto 2016**. Brasília: CONAB, v.3, 2016. 176p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_08_09_12_08_19_boletim_graos_agosto_2016.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2016.

CONCEIÇÃO, L. D. H. S.; SERENO, M. J. C. M.; BARBOSA NETO, F. Tolerância ao alumínio em plantas: toxicidade, mecanismos e genes em espécies cultivadas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.14, p.01-10, 2008.

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.1231-1237, 2004.

COSTA, H. M. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v.74, p.119-132, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; MAUAD, M.; ALVAREZ, R. C. F.; LIMA, E. V.; TIRITAN, C. S. Doses de fósforo e crescimento radicular de cultivares de arroz de terras altas. **Bragantia**, v.64, n.4, p.643-649, 2005.

DALLA NORA, D. D.; AMADO, T. J. C. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. **Agronomy Journal**, v.105, p.1393-1403, 2013.

DALLA NORA, D. D.; AMADO, T. J. C.; GIARDELLO, V. C.; MERTINS, C. Gesso: alternativa para redistribuir verticalmente nutrientes no perfil do solo sob sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v.133, p.8-20, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Safira**. São Carlos: EMBRAPA INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2010. Disponível em: <<http://labimagem.cnpdia.embrapa.br/Ferramentas.aspx?ferramenta=4>>. Acesso em: abr. 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353p.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. 2.ed. Lages: O Autor, 2016. 256p.

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

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, p.6-16, 1998.

FAGERIA, N. K. **The role of plant roots in crop production**. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2013. 451p.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plantas. **Advances in Agronomy**, v.110, p.251-331, 2011.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO E IRRIGAÇÃO – FEBRAPDP. **Evolução do sistema plantio direto no Paraná**. 2014. 4p. Disponível em: <http://febrapdp.org.br/download/EVOLUCAO_DO_SPD_NO_PARANA_2014.pdf>. Acesso em 23 jun. 2016.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Absorção de nutrients. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p.115-152.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, p.109-112, 2014.

FUNDAÇÃO ABC. **Monitoramento: Estações Agrometeorológicas**. Disponível em: <<http://sma.fundacaoabc.org/monitoramento/grafico/mensal>>. Acesso em 20 ago. 2016.

GONÇALVES JUNIOR, A. C.; NACKE, H.; MARENGONI, N. G.; CARVALHO, E. A.; COELHO, G. F. Produtividade e componentes de produção da soja adubada com diferentes doses de fósforo, potássio e zinco. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, p.660-666, 2010.

GUARESCHI, R. F.; GAZOLLA, P. R.; SOUCHIE, E. L.; ROCHA, A. C. Adubação fosfatada e potássica na semeadura e a lanço antecipada na cultura da soja cultivada em solo de Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 4, p. 769-774, 2008.

HAVLIN, J. H.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management**. 8.ed. New Jersey: Prentice Hall, 2014. 505p.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; MOLLER, I. S.; WHITE, P. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. San Diego: Elsevier, 2012. p.135-190.

IBM®. **Software SPSS Statistics Base versão 22.0**. 2013. Disponível em: <<http://www-03.ibm.com/software/products/pt/spss-stats-base>>. Acesso em: 05 ago. 2016.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE – IPNI. **Estimates of nutrient uptake and removal**. 2012. Disponível em: <<http://www.ipni.net/article/IPNI-3296>>. Acesso em: 23 jun. 2016.

JORGE, L. A. C.; SILVA, D. J. C. B. **Safira: manual de utilização**. São Carlos: EMBRAPA INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2010. 29p.

LAMBERS, H.; SHANE, M. W.; CRAMER, M. D.; PEARSE, S. J.; VENEKLAAS, E. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. **Annals of Botany**, v. 98, 693-713, 2006.

LI, H.; MOLLIERC, A.; ZIADIA, N.; SHIA, Y.; PARENTB, L. E.; MOREL, C. Soybean root traits after 24 years of different soil tillage and mineral phosphorus fertilization management. **Soil & Tillage Research**, v.165, p.258-267. 2017.

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Root strategies for phosphorus acquisition. In: WHITE, P. J.; HAMMOND, J. P. (Eds.). **The ecophysiology of plant-phosphorus interactions**. Heidelberg: Springer, 2008. p.83-116.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. **Bioscience Journal**, v.28, p.1-7, 2012.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Bioscience Journal**, v.27, p.70-76, 2011.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Potafós, 1997. 319p.

MANSCHADI, A. M.; KAUL, H. P.; VOLLMANN, J.; EITZINGER, J.; WENZEL, W. Developing phosphorus-efficient crop varieties: An interdisciplinary research framework. **Field Crops Research**, Article in Press, 2014.

MARTINI, J.A.; MUTTERS, R.G. Soybean root growth and nutrient uptake as affected by lime rates and plant age: I. Al, Mn, P and S. **Turrialva**, v.39, p.18-24, 1989.

MELO, R. M.; BARROS, M. F. C.; SANTOS, P. M.; ROLIM, M. M. Reclamation of saline-sodic soils by application of mineral gypsum, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.12, p.376-380, 2008.

MENOSSO, O. G.; COSTA, J. A.; ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Tolerância de genótipos de soja ao alumínio em solução. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v., p.2157-2166, 2000.

NEUMANN, G.; RÖMHELD, V. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. San Diego: Elsevier, 2012. p.347-368.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

OLEYNIK, J.; BRAGAGNOLO, N.; BUBLITZ, U.; SILVA, C. C. **Análise de solo: tabelas para transformação de resultados analíticos e interpretação de resultados**. 5.ed. Curitiba: EMATER, 1998. 64p.

OLIVEIRA, C. M. B.; GATIBONI, L. C.; MIQUELLUTI, D. J.; SMYTH, T. J.; ALMEIDA, J. A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia de ligação em Latossolo Vermelho-Amarelo em razão de diferentes ajustes do modelo de Langmuir. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1805-1815, 2014.

OLIVEIRA, H. J.; ERNANI, P. R.; AMARANTE, C. V. T. Alteração na composição química das fases sólidas e líquida de um solo ácido pela aplicação de calcário e gesso agrícola. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.1, p.93-101, 2002.

OLIVEIRA, I. P.; COSTA, K. A. P.; FAQUIM, V.; MACIEL, G.A.; NEVES, B. P.; MACHADO, E. L. Efeitos de fontes de cálcio no desenvolvimento de gramíneas solteiras e consorciadas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p.592-598, 2009.

PAULETTI, V. **Nutrientes: teores e interpretação**. 2.ed. Castro: Fundação ABC, 2004. 86p.

PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.495-505, 2014.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. 38p.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, v.105, p.149-155, 2009.

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

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

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

RAIJ, B.; QUAGGIO, J. A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. In: RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Eds.). **Análises químicas para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, p.189-199, 2001.

RAMPIM, L.; LANA, M. C. Ion mobility and base saturation after gypsum application in continuous soybean-wheat cropping system under no-till. **Australian Journal of Crop Science**, v.9, p.468-476, 2015.

RAMPIM, L.; LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em Latossolo Vermelho submetido ao gesso cultivado com trigo e soja. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, p.1623-1638, 2013.

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

RICHARDSON, A. E.; LYNCH, J. P.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; SMITH, F. A.; SMITH, S. E.; HARVEY, P. R.; RYAN, M. H.; VENEKLAAS, E. J.; LAMBERS, H.; OBERSON, A.; CULVENOR, R. A.; SIMPSON, R. J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus -efficiency of agriculture. **Plant and Soil**, v.349, p.121-156, 2011.

ROSOLEM, C. A.; MARCELLO, C. S. Crescimento radicular e nutrição mineral da soja em função da calagem e adubação fosfatada. **Scientia Agricola**, v.55, p.448-455, 1998.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.821-828, 1999.

SARMENTO, P.; CORSI, M.; CAMPOS, F. P. Resposta da alfafa a fontes de fósforo associadas ao gesso e à calagem. **Scientia Agricola**, v.58, p.381-390, 2001.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, p.576-586, 2008.

SELLES, F.; KOCHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; ZENTNER, R. P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. **Soil Tillage & Research**, v.44, p. 23-34, 1997.

SILVA, A. A.; DELATORRE, C. A. Alterações na arquitetura de raiz em resposta à disponibilidade de fósforo e nitrogênio. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.8, p.152-163, 2009.

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. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2002. p.147-185.

SOUZA, F. R.; ROSA JÚNIOR, E. J.; FIETZ, C. R.; BERGAMIN, A. C.; MJARDIM ROSA, Y. B. C.; ZEVIANI, W. M. Efeito do gesso nas propriedades químicas do solo sob dois sistemas de manejo. **Semina: Ciências Agrárias**, v.33, n. 5, p.1717-1732, 2012.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University, 1989. 277p.

SUMNER, M. E.; SHAHANDEH, H.; BOUTON, J.; HAMMEL, J. Amelioration of an acid soil prolife through deep liming an surface application of gypsum. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1254-1278, 1986.

SYERS, J .K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information**. Roma: FAO, 2008. 108p.

TIECHER, T.; SANTOS, D. R.; RASCHE, J. W. A.; BRUNETTO, G.; MALLMANN, F. J. K.; PICCIN, R. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada. **Bragantia**, v.71, p.518-527, 2012.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **World agricultural supply and demand estimates: August 2016**. 40p. Diponível em: <<http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLEN, D. L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, v.157, p.423-447, 2003.

VIEIRA, R. C. B.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; MORAES, P.; CARNIEL, E. Adubação fosfatada para alta produtividade de soja, milho e cereais de inverno cultivados em rotação em Latossolos em plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p.794-808, 2015.

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

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

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid Oxisol under no-till system. **Nutrient Cycling in Agroecosystem**, v.79, p.169-179, 2007b.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.45, p.128-137, 2015.

4 – EFEITO RESIDUAL DO GESSO AGRÍCOLA NA EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA A SUCESSÃO TRIGO-SOJA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

4.1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da adubação fosfatada para a sucessão trigo-soja, após 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola em sistema plantio direto. O experimento foi instalado em outubro de 2013 no município de Ponta Grossa, em um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa. O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos ao acaso em parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas (180 m²) foram aplicadas, no sulco de semeadura, nas safras de inverno e verão, quatro doses de P (0, 30, 60 e 90 kg P₂O₅ ha⁻¹) na forma de superfosfato triplo (SFT) e, nas subparcelas (45 m²), foram empregadas quatro doses de gesso agrícola (0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹), a lançar sobre a superfície, apenas no primeiro ano, em outubro de 2013. A sucessão de culturas do experimento foi: soja (2013–14), trigo (2014) e soja (2014–15). No presente trabalho, avaliou-se o efeito residual do gesso, após 12 e 18 meses da sua aplicação (em outubro 2013), e os efeitos das doses de P aplicadas no sulco de semeadura do trigo (2014) e da soja (2014–15). As avaliações realizadas nas culturas de trigo (2014) e soja (2014–15) foram: atributos de raiz (área superficial, volume, diâmetro médio, comprimento total e massa seca), diagnose foliar, extração e exportação de nutrientes, eficiências de aproveitamento do P e rendimento de grãos. Também foram avaliados os atributos químicos de solo (pH, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, S-SO₄²⁻ e P extraído por solução de Mehlich-1 e resina trocadora de ânions) nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm de profundidade. O residual do gesso no solo aumentou a eficiência de uso do P (EUP) pela cultura do trigo até a dose de 5 t ha⁻¹ e também a EUP da soja até a dose de 4,3 t ha⁻¹. Observou-se que a aplicação de gesso na superfície do solo pode proporcionar economia com a adubação fosfatada e manter elevado teto de rendimento de grãos. Isso foi constatado na cultura do trigo em que houve interação significativa entre as doses de P e de gesso no rendimento de grãos. Nesse caso, a máxima produtividade de trigo seria obtida com 90 kg P₂O₅ ha⁻¹ na semeadura sem aplicação de gesso (4.987 kg ha⁻¹), com 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ na semeadura e 2,0 t ha⁻¹ de gesso (4.942 kg ha⁻¹) e sem aplicação de P na semeadura com 4,0 t ha⁻¹ (4.653 kg ha⁻¹) ou 6,0 t ha⁻¹ (4.621 kg ha⁻¹) de gesso. A dose de P na semeadura poderia ser diminuída com o aumento na dose de gesso até 4,0 t ha⁻¹, sem comprometer o rendimento de grãos de trigo. No caso da soja, o rendimento de grãos ocorreu de forma independente da interação, tendo-se obtido maior produtividade de soja com a aplicação de 50 kg P₂O₅ ha⁻¹ na semeadura. A disponibilidade de P no solo afetou o crescimento radicular que, por sua vez, interferiu no rendimento de grãos das culturas de trigo e soja. Por isso, o aumento na EUP pelas culturas esteve relacionado a ambos os fatores. O efeito residual da dose mais elevada de gesso agrícola (6 t ha⁻¹) sobre a superfície em conjunto com a dose mais elevada de P na semeadura (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) prejudicou o crescimento radicular e o rendimento de grãos, principalmente da cultura do trigo. O uso de gesso agrícola aumenta a EUP pelas culturas de trigo e soja, mas é preciso cuidado com a aplicação de dose excessiva de gesso agrícola associada com alta dose de P na semeadura porque, nesse caso, o crescimento das raízes e a produtividade das culturas podem ser comprometidos.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* (L.). *Glycine max* (L.) Merrill. Fósforo. Fosfogesso. Subsolo ácido. Latossolo argiloso.

RESIDUAL EFFECT OF GYPSUM ON THE EFFICIENCY OF PHOSPHATE FERTILIZER FOR WHEAT–SOYBEAN SUCCESSION UNDER NO-TILL

4.2 ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the efficiency of phosphate fertilization for wheat–soybean succession, after 12 and 18 months of application of gypsum in no-tillage system. The experiment was installed in October 2013 in the municipality of Ponta Grossa, in an Oxisol, clay texture. The experimental design was the randomized complete blocks in split-plot, with three replications. In the plots (180 m²), four rates of P (0, 30, 60 and 90 kg P₂O₅ ha⁻¹) were applied at sowing in the winter and summer harvests in the form of triple superphosphate (SFT), and in the subplots (45 m²), four rates of gypsum (0, 2, 4 and 6 t ha⁻¹) were used, on the surface, only in the first year, in October 2013. The crop succession of the experiment was: soybean (2013–14), wheat (2014) and soybean (2014–15). The residual effect of gypsum was evaluated after 12 and 18 months of application (in October 2013), and the effects of P rates applied in the wheat (2014) and soybean (2014–15). The evaluations carried out on wheat (2014) and soybean (2014–15) crops were: root attributes (surface area, volume, mean diameter, total length and dry mass), foliar diagnosis, nutrient extraction and export, P utilization efficiencies and grain yield. The following soil chemical attributes were evaluated: pH, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, S–SO₄²⁻ and P extracted with Mehlich-1 solution and anion exchange resin in layers 0–10, 10–20, 20–40 and 40–60 cm deep. Residual gypsum in the soil increased P use efficiency (PUE) by the wheat crop up to the rate of 5 t ha⁻¹ and also the PUE of the soybean until the rate of 4.3 t ha⁻¹. Adjusting the gypsum and P rates at sowing appropriately, it is possible to obtain high grain yields and provides economy of the phosphate fertilizer. This was observed in the wheat crop where there was a significant interaction between the P and gypsum doses in the grain yield. In this case, maximum wheat yield would be obtained with 90 kg P₂O₅ ha⁻¹ at sowing without application of gypsum (4,987 kg ha⁻¹), with 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ at sowing and 2.0 t ha⁻¹ of gypsum (4,942 kg ha⁻¹) and without application of P in sowing with 4.0 t ha⁻¹ (4,653 kg ha⁻¹) or 6.0 t ha⁻¹ (4,621 kg ha⁻¹) of gypsum. It is noted that the P dose at sowing could be decreased with the increase in the gypsum dose up to 4.0 t ha⁻¹, without compromising the yield of wheat grains. In the case of soybeans, grain yield occurred independently of the interaction, resulting in higher soybean yield with the application of 50 kg P₂O₅ ha⁻¹ at sowing. The availability of P in soil affected root growth, which in turn interfered with grain yield of wheat and soybean crops. Therefore, the increase in PUE by cultures was related to both factors. The residual effect of the higher rate of agricultural gypsum (6 t ha⁻¹) on the surface together with the higher rate of P at sowing (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) prejudiced root growth and grain yield, mainly of wheat. The use of agricultural gypsum increases PUE by wheat and soybean crops, but the application of excessive rate of gypsum associated with high rate of P at sowing should be done with caution because, in this case, root growth and grain yield can be compromised.

Keywords: *Triticum aestivum* (L.). *Glycine max* (L.) Merrill. Phosphorus. Phosphogypsum. Subsoil acidity. Clayey Oxisol.

4.3 INTRODUÇÃO

Na agricultura, a intensificação dos sistemas produtivos tem sido realizada com o objetivo de alcançar maiores produtividades agrícolas, lucratividade financeira e sustentabilidade ambiental. O Brasil encontra-se entre as maiores potências na produção de grãos no mundo, cultivando aproximadamente 58,2 milhões de hectares, dos quais o Estado do Paraná representa 9,7 milhões de hectares (CONAB, 2016), sendo o segundo maior Estado produtor. Atualmente, a maioria das lavouras comerciais do Brasil é cultivada em sistema plantio direto (SPD), com uma área de cerca de 32 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2015). A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] e o trigo (*Triticum aestivum* L.) destacam-se como as principais culturas de grãos produzidas no país nas safras de verão e de inverno, respectivamente. Entre as culturas da safra de verão, a soja representa cerca de 60% das áreas agrícolas cultivadas, enquanto o trigo representa 83% das áreas cultivadas com grãos no inverno (CONAB, 2016).

O fósforo (P) é um nutriente de fundamental importância no desempenho das culturas, sendo indispensável na agricultura por ser fonte principal de energia às plantas (RAIJ, 2011). Entretanto, devido à baixa disponibilidade do P em solos tropicais e subtropicais, este é o nutriente que mais tem limitado a produção de culturas no Brasil, sendo necessária a aplicação de quantidades elevadas de P na adubação (NOVAIS & SMYTH, 1999; OLIVEIRA et al., 2014; SANTOS et al., 2008). Na região Sul do Brasil, o P normalmente é aplicado por ocasião da semeadura da cultura de grãos, na forma de fertilizantes fosfatados solúveis em água (MOLIN et al., 2015; SANTOS et al., 2008). Porém, nos últimos anos, pesquisas inerentes ao uso mais eficiente de P tem adquirido grande importância, basicamente em decorrência do custo elevado dos fertilizantes fosfatados solúveis em água (ANDA, 2016) e, ainda, da preocupação com o esgotamento dos minérios de rochas fosfáticas, ainda neste século (SCHOLZ et al., 2013).

O gesso agrícola é um subproduto da indústria do ácido fosfórico, utilizado como fonte de cálcio (Ca) e enxofre (S) para as plantas e condicionador de subsuperfície, por aumentar a disponibilidade de Ca e diminuir a toxicidade do alumínio (Al) em profundidade (CAIRES et al., 2001; 2002; 2003; 2006; 2011a,b; RAMPIM et al., 2011; 2013; 2015; ZANDONÁ et al., 2015). O Al trocável prejudica o crescimento radicular das espécies vegetais sensíveis, reduzindo a absorção de água e nutrientes pelas plantas (FAGERIA & MOREIRA, 2011). O gesso agrícola apresenta cerca de 6,0–7,5 g kg⁻¹ de P₂O₅ em sua composição, como impureza (VITTI et al., 2008), podendo melhorar a disponibilidade de P no solo quando utilizado em

doses elevadas (CAIRES et al., 2003; 2011b; RAMPIM et al., 2013). Além disso, ao melhorar as condições químicas do subsolo, o gesso agrícola pode aumentar o volume de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, o aproveitamento do P pelas plantas.

Em SPD, a aplicação de fertilizantes e corretivos leva em consideração não apenas uma cultura isoladamente, mas também, a sucessão de culturas no sistema (FEBRAPDP, 2015). O residual de P liberado pelo gesso agrícola, ao longo do tempo, pode ser uma alternativa interessante na economia com a adubação fosfatada (realizada com fertilizantes solúveis) para sucessão de cultivos, a exemplo ‘trigo–soja’ em SPD. Destaca-se, ainda, que a melhoria do ambiente radicular proporcionada pelo uso de gesso agrícola pode aumentar a eficiência de uso do P, tendo em vista a baixa mobilidade deste nutriente na solução do solo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da adubação fosfatada para a sucessão trigo–soja, após 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola em SPD.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi instalado em outubro de 2013 no município de Ponta Grossa, região Centro-Sul do Paraná (25°03'23"S, 50°04'55"W e 972 m de altitude), em um Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 2013) textura argilosa. Os resultados das análises químicas e granulométricas do solo realizadas antes da implantação do experimento são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados da análise química e granulométrica do solo, antes da instalação do experimento, em outubro de 2013.

Camada ---cm---	pH CaCl ₂	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P Mehlich-1	SO ₄ ²⁻ (¹)	V(²)	m(³)	C	Areia	Silte	Argila
		-----mmol _c dm ⁻³ -----				-----mg dm ⁻³ -----		----%----			-----g dm ⁻³ -----		
0-10	4,9	1	38	11	2,7	18,3	8,0	44	1,9	30	404	116	480
10-20	4,7	4	29	7	1,2	3,0	8,5	34	9,7	21	372	128	500
20-40	4,4	9	12	5	0,9	2,0	9,7	16	33,5	22	310	110	580
40-60	4,3	10	9	3	0,4	0,5	11,3	12	44,6	14	292	128	580

(¹)SO₄²⁻ = enxofre na forma de sulfato extraído com solução de fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹; (²)V = saturação por bases; (³)m = saturação por alumínio.

O solo encontrava-se há 10 anos sob sistema plantio direto, com predominância da sucessão trigo-soja. Apenas em 2007 e 2013, a aveia preta foi cultivada como cobertura do solo na estação de outono-inverno. Destaca-se que, antes da instalação das parcelas experimentais, foram aplicadas 2,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico na superfície e em área total em 12 julho de 2013.

Segundo o sistema de classificação de Köppen-Geiger (PEEL et al., 2007), o clima da região é do tipo Cfb (mesotérmico, húmido, subtropical), com verões frescos, geadas frequentes e sem a presença de estação seca definida. As temperaturas máximas e mínimas para a região são de 22 e 13 °C, respectivamente. A precipitação anual é em torno de 1.550 mm. As temperaturas médias do ar e as precipitações pluviais mensais, históricas da região (últimos 16 anos) e as ocorridas desde a implantação do experimento, em outubro de 2013, até a safra 2014–15, podem ser observadas na Figura 4.1.

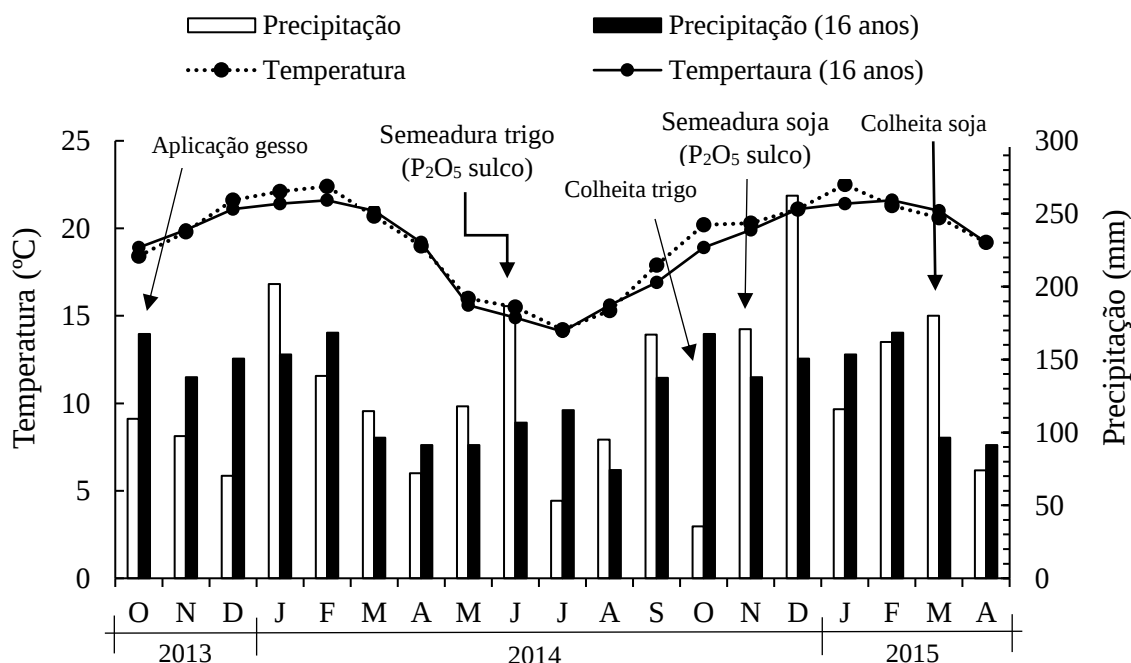


Figura 4.1 – Médias históricas de temperatura do ar e de precipitação pluvial (16 anos) e as ocorridas desde a implantação do experimento, em outubro de 2013, até a safra (2014–15). Fonte: Fundação ABC.

Observa-se que houve maiores desvios da precipitação mensal em relação à histórica (16 anos), com redução de chuva nos meses de outubro, novembro e dezembro de 2013; e, junho e outubro de 2014. Por outro lado, precipitações mensais elevadas (acima de 200 mm), superiores à média histórica, também foram verificadas em janeiro de 2013 e 2014, e também, em dezembro de 2014. Para os demais meses, compreendendo o período experimental de outubro de 2013 a março de 2015, as médias de precipitação foram similares à média histórica. Com relação a temperatura média do ar, nota-se que, durante o período que as culturas estiveram em campo (trigo e soja), as variações foram pequenas quando comparadas à média histórica (16 últimos anos).

4.4.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos ao acaso em parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas (180 m²) foram aplicadas quatro doses de P (0, 30, 60 e 90 kg P₂O₅ ha⁻¹) na forma de superfosfato triplo (SFT), no sulco de semeadura da soja (2013–14 e 2014–15), e do trigo (2014), e nas subparcelas (45 m²), foram empregadas quatro doses de gesso agrícola (0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹), a lançar sobre a superfície do

solo, apenas no primeiro ano (na instalação do experimento), em outubro de 2013. O SFT (granulado) continha 460, 380 e 130 g kg⁻¹ de P₂O₅ total, P₂O₅ solúvel em água e CaO, respectivamente. O gesso agrícola (pó, in natura) continha 227, 181 e 17 g kg⁻¹ de Ca, S-SO₄²⁻ e P₂O₅, respectivamente, e 152 g kg⁻¹ de teor de água. Destaca-se que o gesso agrícola apresentou quantidade superior de P₂O₅ em sua composição, em relação ao que tem sido descrito na literatura – 6,0 a 7,5 g kg⁻¹ (VITTI et al., 2008), não sendo, entretanto, uma seleção proposital.

4.4.3 Sucessão de culturas

A sucessão de culturas do experimento foi: soja (2013–14), trigo (2014) e soja (2014–15). No presente capítulo, avaliou-se o efeito residual do gesso, após 12 e 18 meses da sua aplicação (em outubro 2013), e os efeitos das doses de P aplicadas no sulco de semeadura do trigo (2014) e da soja (2014–15).

O trigo (2014), cv. OR/Biotrigo Supera, foi semeado em 22 de junho de 2014, em linhas espaçadas de 0,17 m, utilizando-se 350 sementes m⁻². Esse cultivar foi selecionado por se tratar de um cultivar precoce (entre 60 a 70 dias da emergência ao espigamento), altura média de 0,84 m, sendo moderadamente resistente ao acamamento. Caracteriza-se por ser um trigo com boa capacidade de perfilhamento, alto potencial produtivo e alta qualidade industrial para farinha branqueadora de alta estabilidade (trigo tipo pão). Após cinco dias da semeadura do trigo, foi realizada adubação nitrogenada e potássica, aplicando-se a lanço, na superfície e em área total, 30 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia e 100 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de KCl. Para adubação de cobertura, no início do perfilhamento aplicou-se a lanço, em área total, 70 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia.

A semeadura da soja (2014–15), cv. Nidera 5909 RG (uma das mais utilizadas na região Centro-Sul do Paraná, devido ao alto potencial produtivo), foi realizada em 10 de novembro de 2014, com espaçamento de 0,45 m entre as linhas e densidade de semeadura de 14 sementes m⁻¹. As sementes de soja foram inoculadas com estirpes selecionadas de *Bradyrhizobium japonicum* (100 ml para 50 kg de sementes – 5×10⁹ Ufc ml⁻¹) por ocasião da semeadura. Após a emergência das plântulas de soja foi realizada adubação potássica aplicando-se, em superfície e em área total, 100 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de KCl.

O manejo e os tratos fitossanitários para as culturas de trigo (2014) e soja (2014–15) foram realizados em conformidade com as recomendações técnicas das culturas, de modo a permitir o adequado desenvolvimento das plantas. A colheita das culturas procedeu-se em

uma área de 6,0 m² em cada subparcela, sendo que o trigo (2014) foi colhido em 24 de outubro de 2014 e a soja (2014–15) em 20 de março de 2015.

4.4.4 Avaliações

4.4.4.1 Avaliações e análises laboratoriais das plantas

Amostras de folhas foram coletadas no florescimento das culturas para fins de diagnose nutricional, retirando-se folhas bandeira do trigo (estádio fenológico de antese) e o terceiro trifólio a partir do ápice da soja (estádio R2), em 30 plantas de cada subparcela, por ocasião do florescimento das culturas. A produção de massa seca (MS) e o acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas foram avaliados na maturidade fisiológica das culturas – trigo apresentando consistência de grãos em massa pastosa e soja em estágio R6. Para isso, foi coletado 1,0 m de plantas de trigo e soja, somente a parte aérea, de cada subparcela.

As amostras de folhas para diagnose nutricional e as da parte aérea das plantas foram lavadas com água deionizada, secas em estufa a 60 °C, moídas em moinho com malha de 1,0 mm e armazenadas em embalagens plásticas até a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn, conforme os métodos descritos em Malavolta et al. (1997). A extração dos nutrientes pela parte aérea das plantas de trigo e soja foi calculada mediante multiplicação da concentração do nutriente pela MS correspondente.

Após a maturidade fisiológica, em ambas as áreas, o trigo (grãos apresentando consistência dura) e a soja (estádio R8) foram colhidos (6,0 m² de cada subparcela) e trilhados, determinando-se o rendimento de grãos a 130 g kg⁻¹ de teor de água. As concentrações dos nutrientes nos grãos das culturas também foram determinadas de acordo com Malavolta et al. (1997). A exportação de nutrientes pelos grãos de trigo e soja foi calculada com base nos resultados de concentração de nutrientes e rendimento de grãos das respectivas culturas.

4.4.4.2 Avaliações e análises laboratoriais das raízes

Por ocasião do florescimento das plantas de trigo e de soja foram retiradas seis subamostras de raízes (três na linha e três na entrelinha) para compor uma amostra composta, por meio de trado cilíndrico (3,6 cm de diâmetro), nas profundidades de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm. As amostras de raízes foram coletadas somente em quatro tratamentos, com três

repetições: (i) sem gesso e sem P (testemunha); (ii) com gesso ($6,0 \text{ t ha}^{-1}$) e sem P; (iii) sem gesso e com P (90 kg ha^{-1} de P_2O_5); e (iv) com gesso e com P ($6,0 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso e 90 kg ha^{-1} de P_2O_5).

As raízes foram separadas do solo por dispersão em água, utilizando-se peneira com malha de 0,5 mm e separadas de eventuais partículas orgânicas por triagem manual utilizando-se pinça com ponta curva. Na sequência, as raízes foram coloridas com solução de permanganato de potássio a 1,0% e fotografadas com câmera de 13 Megapixels e resolução de 4.128×3.096 pixels. Por meio da utilização do software Safira versão 2010 (EMBRAPA, 2010; JORGE & SILVA, 2010), as imagens foram analisadas, determinando-se a área superficial, o volume, o diâmetro médio e o comprimento total. Depois, as amostras foram secas em estufa à 60°C e pesadas para a determinação da massa seca de raízes (MSR).

4.4.4.3 Avaliações e análises laboratoriais dos solos

Amostras de solo foram coletadas após a colheita do trigo e da soja, nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm de profundidade. Foram retiradas 15 subamostras de cada subparcela com trado calador para constituir uma amostra composta das camadas de 0–10 e 10–20 cm, e cinco subamostras com trado holandês das camadas de 20–40 e 40–60 cm. Depois de secas em estufa com circulação forçada de ar a 40°C , as amostras de solo foram destorroadas, moídas e passadas em peneira com malha de 2,0 mm. Nessas amostras foram determinados o pH em CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$; os teores de Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} com solução KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$; K^+ e P com solução de Mehlich-1; e enxofre (S-SO_4^{2-}) com solução de fosfato de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, conforme métodos propostos por Pavan et al. (1992) e Cantarella & Prochnow (2001). O P disponível também foi avaliado pelo método da resina trocadora de ânions (RTA), de acordo com metodologia de Raij & Quaggio (2001). Destaca-se que, as análises de solo após a colheita do trigo (2014) e da soja (2014–15), corresponderam a 12 e 18 meses da aplicação de gesso, respectivamente.

4.4.5 Efeitos do residual de gesso na eficiência da adubação fosfatada

As seguintes eficiências foram calculadas com base na metodologia de Fageria et al. (1998), considerando-se as doses de P ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) aplicadas nos tratamentos sem gesso e com 2, 4 e 6 t ha^{-1} de gesso:

4.4.5.1 Eficiência agronômica (EA, kg kg⁻¹)

$$EA, \text{ kg kg}^{-1} = \frac{\text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}{\text{Dose de P aplicada (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

4.4.5.2 Eficiência fisiológica (EF, kg kg⁻¹)

$$EF, \text{ kg kg}^{-1} = \frac{\text{Produção de MS (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{Produção de MS (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}{\text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}$$

onde, MS é a massa seca total da parte aérea das plantas de trigo ou soja.

4.4.5.3 Eficiência agrofisiológica (EAF, kg kg⁻¹)

$$EAF, \text{ kg kg}^{-1} = \frac{\text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}{\text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}$$

4.4.5.4 Eficiência na recuperação aparente (ERA, kg kg⁻¹)

$$ERA, \text{ kg kg}^{-1} = \frac{\text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}{\text{Dose de P aplicada (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

4.4.5.5 Fator parcial de produtividade (FPP, kg kg⁻¹)

$$FPP, \text{ kg kg}^{-1} = \frac{\text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) com P}}{\text{Dose de P aplicada (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

4.4.5.6 Eficiência de uso do P (EUP, kg kg⁻¹)

$$EUP, \text{ kg kg}^{-1} = EF \times ERA$$

4.4.6 Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos às análises de variância e de regressão. Equações de regressão por polinômios ortogonais foram ajustadas aos dados obtidos em função das doses

de gesso e de P aplicadas. Na ausência de interação significativa entre doses de P $\times$ doses de gesso, foram consideradas as médias das observações e, no caso de interação significativa, realizou-se os desdobramentos. Foram consideradas somente as equações de regressão significativas a 5%. Os resultados de atributos de raízes foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5%, procedendo-se o desdobramento dos tratamentos quando a interação foi significativa. As análises estatísticas foram realizadas por meio da utilização do programa Sisvar versão 5.6 (FERREIRA, 2014). Foram realizadas correlações de Pearson (r) entre: (i) os atributos de raízes e os atributos químicos de solo; (ii) o rendimento de grãos e a exportação de nutrientes; e (iii) o rendimento de grãos e os atributos de raízes (densidade de comprimento e comprimento radicular por área). As correlações foram realizadas com a utilização do programa SPSS Statistics Base versão 22.0 (IBM, 2013).

4.5 RESULTADOS

4.5.1 Alterações nos atributos químicos do solo

4.5.1.1 Alterações nos atributos químicos do solo após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura do trigo (2014) e 12 meses da aplicação de gesso agrícola

A maioria dos atributos químicos de solo avaliados após a aplicação de P na semeadura do trigo (2014) e 12 meses da aplicação de gesso não foi influenciada pela interação entre os tratamentos (Tabelas 4.2 e 4.3). Entretanto, foi verificada interação significativa entre os tratamentos para os teores de Al^{3+} nas camadas mais superficiais do solo (0–10 e 10–20 cm) (Tabela 4.4), para a saturação por Al (m%) nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–40 cm (Tabela 4.5), e para os teores de Ca^{2+} em todas as camadas amostradas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm) (Tabela 4.6).

Na Tabela 4.2 é possível observar os efeitos das doses de P sobre os atributos químicos do solo. As doses de P não influenciaram significativamente a acidez ativa (pH), a acidez trocável (Al^{3+}), a m%, e nem os teores de K^+ , em todas as camadas de solo estudadas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). De maneira isolada, as doses de P aumentaram de forma quadrática os teores de Ca^{2+} apenas na camada mais superficial, de 0–10 cm. O acréscimo de P no solo também promoveu aumento linear nos teores de Mg^{2+} na camada de 0–10 cm, e em consequência disso, a relação Ca:Mg foi diminuída nesta camada.

Os teores de P no solo, na camada 0–10 cm, aumentaram linearmente com as doses de P, pelos dois procedimentos de extração (Mehlich-1 e RTA). Porém, na camada subsequente de 10–20 cm, observou-se acréscimo no teor de P apenas com o extrator de Mehlich-1. Nas demais camadas, não houve alteração nos teores de P no solo com o aumento das doses de P. Os teores de SO_4^{2-} aumentaram com as doses de P de forma linear, na camada de 0–10 cm, e quadrática, nas camadas mais profundas de 20–40 e 40–60 cm. As doses de P não alteraram o teor de SO_4^{2-} na camada de 10–20 cm (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Alterações nos atributos químicos de solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura do trigo (2014).

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P Mehlich	P Resina	SO ₄ ²⁻	m ⁽¹⁾	Ca:Mg
		-----mmol _c dm ⁻³ -----				-----mg dm ⁻³ -----			%	
Camada de 0–10 cm										
0	4,9	0,9	52,5	23,8	3,8	15,4	25,1	22,0	1,1	2,3
30	4,9	0,7	54,2	22,5	3,8	15,6	28,3	23,5	0,9	2,5
60	4,9	0,8	56,2	30,7	3,8	17,1	30,9	22,8	0,9	1,9
90	4,8	1,0	51,8	27,1	3,6	22,0	30,5	27,3	1,3	2,0
Efeito	ns	-	Q*	L*	ns	L**	L**	L**	-	L*
CV (%)	3,9	32,6	16,2	20,8	9,8	19,7	9,6	9,7	36,3	21,0
Camada de 10–20 cm										
0	4,5	8,7	26,8	19,3	2,0	2,5	10,0	28,0	15,7	1,5
30	4,5	7,8	28,7	18,0	2,0	2,9	11,1	27,7	14,2	1,7
60	4,5	7,3	30,6	21,2	2,3	3,0	10,5	22,7	11,9	1,5
90	4,5	7,9	26,5	21,3	2,1	3,2	11,4	29,3	13,9	1,3
Efeito	ns	-	-	ns	ns	L**	ns	ns	-	ns
CV (%)	1,7	21,8	15,9	27,3	18,7	16,9	16,9	9,6	25,9	32,2
Camada de 20–40 cm										
0	4,5	9,8	21,4	17,3	1,7	1,5	7,2	34,9	20,0	1,3
30	4,4	9,0	23,8	15,3	1,8	1,8	7,2	46,7	18,7	1,6
60	4,5	9,3	24,8	24,5	1,8	1,5	7,5	37,3	15,5	1,1
90	4,4	10,4	22,1	18,2	1,8	1,5	7,9	34,2	20,2	1,3
Efeito	ns	ns	-	ns	ns	ns	ns	Q*	-	ns
CV (%)	3,9	18,8	17,8	28,2	14,1	21,4	24,8	19,3	26,0	18,3
Camada de 40–60 cm										
0	4,4	10,6	15,6	19,5	0,9	0,8	5,7	38,5	23,4	0,8
30	4,4	10,3	16,2	19,2	1,3	0,9	6,3	49,3	22,5	0,9
60	4,4	10,3	15,4	22,6	1,2	0,9	6,5	42,0	21,0	0,7
90	4,4	10,9	14,6	19,1	1,3	0,9	6,0	33,8	24,1	0,8
Efeito	ns	ns	-	ns	ns	ns	ns	Q**	ns	ns
CV (%)	3,5	22,2	17,4	24,8	19,3	34,3	28,0	17,7	21,8	21,8

⁽¹⁾m = saturação por alumínio. L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

Os efeitos independentes das doses de gesso sobre os atributos químicos do solo, após 12 meses de sua aplicação, são mostrados na Tabela 4.3. O gesso não influenciou a acidez ativa (pH) nas diferentes profundidades de solo avaliadas, mas reduziu linearmente os teores de Al³⁺ em todas as camadas de solo (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). Com exceção da camada mais superficial do solo (0–10 cm), o gesso também reduziu de forma linear a m% nas demais camadas estudadas (10–20, 20–40 e 40–60 cm).

Tabela 4.3 – Alterações nos atributos químicos de solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após 12 meses da aplicação de gesso agrícola.

Gesso (t ha ⁻¹)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P Mehlich	P Resina	SO ₄ ²⁻	m ⁽¹⁾	Ca:Mg
		-----mmol _c dm ⁻³ -----				-----mg dm ⁻³ -----			%	
Camada de 0–10 cm										
0	4,9	1,0	49,7	31,8	4,3	15,1	28,2	15,0	1,3	1,6
2	4,9	0,8	54,3	25,6	3,8	17,6	28,8	21,1	0,9	2,1
4	4,9	0,8	54,7	25,4	3,6	16,5	28,4	26,2	1,0	2,3
6	4,9	0,7	56,0	21,3	3,2	20,9	29,4	33,3	1,0	2,7
Efeito	ns	L*	L**	L**	L**	L**	ns	L**	-	L**
CV (%)	3,3	31,2	9,4	15,2	12,6	12,4	12,3	22,1	39,3	19,6
Camada de 10–20 cm										
0	4,5	9,2	25,9	19,7	2,2	2,7	10,0	10,9	16,7	1,4
2	4,5	8,1	26,3	20,5	2,0	2,6	10,7	25,6	14,6	1,3
4	4,5	7,2	29,0	20,3	2,1	3,1	10,6	31,0	12,2	1,5
6	4,5	7,2	31,6	19,4	2,1	3,2	11,9	40,1	12,3	1,7
Efeito	ns	L**	L**	ns	ns	L*	ns	L**	L**	L*
CV (%)	3,1	20,9	13,5	20,7	13,9	20,5	19,8	19,7	23,6	24,3
Camada de 20–40 cm										
0	4,4	11,3	17,9	20,6	1,4	1,2	7,2	13,1	22,7	0,9
2	4,4	10,5	19,4	20,4	1,7	1,1	7,1	32,0	20,3	1,0
4	4,4	8,3	25,5	17,6	1,8	1,9	7,8	45,6	15,7	1,6
6	4,5	8,4	29,3	16,6	2,1	1,9	7,7	62,4	15,5	1,8
Efeito	ns	L**	L**	L**	L**	L**	ns	L**	L**	L**
CV (%)	2,6	11,1	14,8	20,6	19,1	21,2	17,7	15,9	17,5	22,7
Camada de 40–60 cm										
0	4,4	11,2	11,5	18,3	0,9	0,6	6,0	16,3	27,4	0,8
2	4,4	10,8	13,3	21,3	1,0	0,7	6,1	27,9	23,4	0,9
4	4,4	10,4	16,2	19,8	1,1	1,0	6,1	47,6	22,0	0,7
6	4,5	9,5	21,1	21,0	1,1	1,1	6,3	71,7	18,7	0,8
Efeito	ns	L**	L**	ns	L**	L**	ns	L**	L**	ns
CV (%)	2,5	14,1	12,6	19,8	13,0	27,5	16,5	18,5	15,9	22,6

⁽¹⁾m = saturação por alumínio. L = efeito linear por análise de regressão; ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

Após 12 meses da aplicação, as doses de gesso aumentaram linearmente os teores de Ca²⁺ e SO₄²⁻ em todas as camadas de solo amostradas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). Entretanto, o Mg²⁺ apresentou decréscimo com o incremento das doses de gesso, na camada superficial (0–10 cm) e na camada de 20–40 cm, permanecendo inalterado nas demais camadas (10–20 e 40–60 cm). A relação Ca:Mg também foi maior de acordo com o aumento das doses de gesso, nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–40 cm. Os teores de K⁺ diminuíram linearmente com as doses de gesso na camada superficial (0–10 cm) e aumentaram, também

de forma linear, nas camadas de 20–40 e 40–60 cm. Em todas as profundidades avaliadas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm), os teores de P do solo aumentaram linearmente com as doses de gesso, apenas com a utilização do extrator de Mehlich-1 (Tabela 4.3).

O desdobramento da interação para os teores de Al^{3+} nas camadas de 0–10 e 10–20 cm demonstrou que o incremento nas doses de P, na ausência do gesso agrícola, causou redução linear do Al^{3+} no solo. Nas doses de 2 e 4 t ha^{-1} de gesso, o aumento nas doses de P não alterou os teores de Al^{3+} . Todavia, em ambas as camadas de solo, com a maior dose de gesso (6 t ha^{-1}), o acréscimo nas doses de P ocasionou significativo aumento nos teores de Al^{3+} no solo. Verificou-se que, nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, o acréscimo de gesso no solo, na ausência de P, causou redução significativa nos teores de Al^{3+} no solo. Porém, na camada mais superficial (0–10 cm), observou-se que, para a dose de 90 kg $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, o incremento nas doses de gesso resultou em maiores teores de Al^{3+} no solo (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Desdobramento da interação para o teor de Al^{3+} ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura do trigo (2014) e 12 meses da aplicação de gesso agrícola.

gesso agrícola						
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso (t ha ⁻¹)				Efeito	R ²
	0	2	4	6		
Camada de 0–10 cm						
0	1,9	1,0	0,7	0,0	L**	0,97
30	1,0	0,7	0,7	0,3	ns	-
60	0,7	0,7	1,0	1,0	ns	-
90	0,7	0,7	1,0	1,8	L*	0,82
Efeito	L**	ns	ns	L**		
R ²	0,80	-	-	0,97		
Camada de 10–20 cm						
0	13,5	9,8	6,0	5,3	L**	0,94
30	8,3	7,7	7,7	7,7	ns	-
60	7,2	7,3	7,3	7,3	ns	-
90	8,0	7,5	7,7	8,5	ns	-
Efeito	L**	ns	ns	L*		
R ²	0,63	-	-	0,78		

L = efeito linear por análise de regressão; ns = não significativo. ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

A análise de variância do desdobramento para a m%, nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–40 cm, revelou que na ausência de gesso, o aumento nas doses de P reduziu a m%. Na dose de 2 t ha^{-1} de gesso, as doses de P reduziram a m% na camada de 10–20 cm. Já, com a aplicação de 4 t ha^{-1} de gesso, as doses de P não alteraram a m%. Entretanto, nota-se que em todas as camadas de solo (0–10, 10–20 e 20–40 cm), o incremento nas doses de P aumentou a m%,

quando a maior dose de gesso (6 t ha^{-1}) foi aplicada. Por outro lado, o aumento nas doses de gesso, na ausência de P, proporcionou redução na m% nas camadas de solo de 0–10, 10–20 e 20–40cm. Na dose de $30 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, o incremento nas doses de gesso também causou redução na m%, nas camadas de 0-10 e 20-40 cm. Já, na dose de $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, não houve influência do gesso sobre a m%. Todavia, na maior dose de P ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), o incremento nas doses de gesso aumentou a m% na camada mais superficial do solo (0-10 cm) (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Desdobramento da interação para a saturação por alumínio (m%), após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura do trigo (2014) e 12 meses da aplicação de gesso agrícola.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso (t ha ⁻¹)				Efeito	R ²
	0	2	4	6		
Camada de 0–10 cm						
0	2,4	1,3	0,9	0,0	L**	0,97
30	1,3	0,8	0,9	0,4	L*	0,85
60	0,7	0,8	1,2	1,1	ns	-
90	0,7	0,9	1,1	2,5	L**	0,79
Efeito	L**	ns	ns	L**		
R ²	0,83	-	-	0,92		
Camada de 10–20 cm						
0	25,1	18,9	10,2	8,6	L**	0,94
30	16,6	14,0	13,8	12,5	ns	-
60	11,4	12,4	12,5	11,4	ns	-
90	13,7	13,1	12,4	16,5	ns	-
Efeito	L**	L*	ns	L*		
R ²	0,72	0,70	-	0,80		
Camada de 20–40 cm						
0	37,3	23,4	13,6	14,2	L**	0,83
30	35,2	19,9	16,6	13,1	L**	0,98
60	18,1	18,7	13,5	14,0	ns	-
90	20,2	19,3	19,2	21,9	ns	-
Efeito	L**	ns	ns	L*		
R ²	0,73	-	-	0,90		

L = efeito linear por análise de regressão; ns = não significativo. ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

Para os teores de Ca^{2+} , o desdobramento revelou que o aumento nas doses de P, na ausência de gesso, proporcionou aumento linear nos teores de Ca^{2+} na camada de 0–10 cm de solo. Já, nas doses de 2 e 4 t ha^{-1} de gesso, o incremento nas doses P não influenciou os teores Ca^{2+} no solo, em nenhuma camada amostrada. Entretanto, na maior dose de gesso (6 t ha^{-1}), o

aumento nas doses de P causou redução linear do Ca^{2+} nas camadas de 0–10, 10–20 e 40–60 cm, e resposta quadrática na camada de 20–40 cm (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Desdobramento da interação para o Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura do trigo (2014) e 12 meses da aplicação de gesso agrícola.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso (t ha ⁻¹)				Efeito	R ²
	0	2	4	6		
Camada de 0–10 cm						
0	43,3	51,0	55,7	60,0	L**	0,97
30	48,7	56,3	52,0	59,7	L*	0,59
60	54,0	56,6	55,2	59,3	ns	-
90	52,7	53,0	55,8	45,1	Q*	0,82
Efeito	L*	ns	ns	L**		
R ²	0,81	-	-	0,93		
Camada de 10–20 cm						
0	20,7	24,7	28,4	33,1	L**	0,99
30	25,3	27,8	28,8	33,5	L*	0,92
60	30,3	26,0	28,9	34,2	ns	-
90	25,3	26,6	30,0	25,4	Q*	0,77
Efeito	ns	ns	ns	L*		
R ²	-	-	-	0,89		
Camada de 20–40 cm						
0	15,3	17,7	26,7	26,0	L**	0,84
30	18,4	20,0	24,0	37,6	L**	0,90
60	19,5	18,4	27,3	34,0	L**	0,84
90	18,2	21,6	24,0	24,7	L*	0,92
Efeito	ns	ns	ns	Q**		
R ²	-	-	-	0,98		
Camada de 40–60 cm						
0	10,0	12,3	16,7	23,2	L**	0,95
30	9,7	15,0	17,0	23,0	L**	0,96
60	13,3	12,1	15,9	20,3	L*	0,77
90	12,0	13,7	15,2	17,6	L*	0,98
Efeito	ns	ns	ns	L**		
R ²	-	-	-	0,92		

L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo.
 ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

Por outro lado, o acréscimo nas doses de gesso, na ausência de P e na dose de 30 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, aumentou os teores de Ca^{2+} em todas as camadas de solo (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). Já, na dose de 60 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, o incremento nas doses de gesso aumentou os teores de Ca^{2+} somente nas camadas mais profundas (20–40 e 40–60 cm). Nota-se que, na

maior dose de P ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), as doses de gesso aumentaram os teores de Ca^{2+} de forma quadrática nas camadas mais superficiais do solo (0–10 e 10–20 cm), e linear nas camadas mais profundas (20–40 e 40–60 cm).

4.5.1.2 Alterações nos atributos químicos do solo após aplicação de fósforo no sulco de semeadura da soja (2014–15) e 18 meses da aplicação de gesso agrícola

Não houve interação significativa entre os tratamentos para nenhum dos atributos químicos de solo avaliados após a aplicação de P na semeadura da soja (2014–15) e 18 meses da aplicação de gesso agrícola. Na Tabela 4.7 estão apresentados os resultados das análises de solo após a aplicação das doses de P na semeadura da soja (2014–15) e, na Tabela 4.8, os efeitos das doses de gesso.

As doses de P não influenciaram os valores de pH, os teores de Al^{3+} e K^+ , e a m% em nenhuma das profundidades de solo amostradas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). O Ca^{2+} apresentou resposta quadrática às doses de P, apenas na camada de 0–10 cm, permanecendo inalterado nas demais camadas do solo (10–20, 20–40 e 40–60 cm). As doses de P aumentaram de forma linear o Mg^{2+} e reduziram a relação Ca:Mg na camada mais superficial (0–10 cm). Os teores de P no solo aumentaram linearmente nas camadas de 0–10 e 10–20 cm com as doses de P aplicadas, tanto pelo extrato de Mehlich-1 quanto pela RTA, enquanto que, o P nas demais camadas, não foi influenciado. Os teores de SO_4^{2-} não foram alterados com o incremento das doses de P, em nenhuma das camadas avaliadas (Tabela 4.7).

Considerando as doses de gesso após 18 meses da aplicação, houve pequeno aumento nos valores de pH da camada mais superficial do solo (0–10 cm), continuando inalterado nas demais camadas (10–20, 20–40 e 40–60). Nessa safra, não foi possível observar diferenças significativas para os teores de Al^{3+} nas profundidades avaliadas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60). Porém, com exceção da camada mais superficial (0–10 cm), nas demais camadas (10–20, 20–40 e 40–60) observou-se redução linear na m% com o incremento das doses de gesso. Os teores de Ca e de SO_4^{2-} aumentaram significativamente em todas as camadas de solo avaliadas com as doses de gesso agrícola. Os teores de Mg^{2+} foram reduzidos na camada mais superficial do solo (0–10 cm), e aumentados nas camadas mais profundas (20–40 e 40–60 cm), com o incremento nas doses de gesso. Em consequência, a relação Ca:Mg aumentou com o uso do gesso nas camadas de 0–10 e 40–60 cm, mas não foi alterada nas outras camadas avaliadas (10–20 e 20–40 cm) (Tabela 4.8).

Tabela 4.7 – Alterações nos atributos químicos de solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura da soja (2014–15).

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P Mehlich	P Resina	SO ₄ ²⁻	m ⁽¹⁾ %	Ca:Mg
-----mmol _c dm ⁻³ -----										
-----mg dm ⁻³ -----										
<i>Camada de 0–10 cm</i>										
0	4,9	0,6	53,6	22,0	4,3	13,6	23,4	11,3	0,7	2,7
30	4,9	0,8	60,0	22,2	4,1	15,6	26,4	11,1	1,0	2,8
60	4,9	0,7	60,1	24,8	4,2	16,7	28,1	10,7	0,8	2,5
90	4,8	0,9	51,7	26,0	4,2	21,8	31,3	11,2	1,2	2,2
Efeito	ns	ns	Q*	L*	ns	L**	L**	ns	ns	L*
CV (%)	3,0	39,7	13,5	14,6	14,5	18,8	18,0	18,6	44,5	19,5
<i>Camada de 10–20 cm</i>										
0	4,5	8,7	26,3	17,8	2,9	2,9	9,7	13,7	15,8	1,5
30	4,5	8,9	28,2	17,8	2,4	3,2	9,9	17,2	15,8	1,6
60	4,6	9,0	29,3	17,4	2,8	3,7	10,2	13,3	15,5	1,7
90	4,5	9,2	26,1	19,5	2,8	5,3	12,2	14,9	16,3	1,4
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	L**	L*	ns	ns	ns
CV (%)	3,0	22,9	14,1	18,2	17,6	21,3	15,6	24,9	27,0	24,8
<i>Camada de 20–40 cm</i>										
0	4,4	12,4	20,9	17,8	2,2	2,1	7,3	27,1	23,7	1,2
30	4,4	12,7	22,4	16,4	2,1	2,4	7,0	26,8	23,8	1,4
60	4,5	12,0	21,1	17,3	2,0	2,0	6,2	25,7	23,8	1,2
90	4,4	12,8	20,2	17,3	2,0	2,7	8,8	25,2	24,6	1,2
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	3,1	12,3	23,1	25,7	8,8	14,3	18,0	26,3	21,1	26,9
<i>Camada de 40–60 cm</i>										
0	4,4	12,9	15,7	19,4	1,3	1,6	4,8	42,6	26,6	0,8
30	4,4	12,8	18,1	18,8	1,3	1,6	4,3	35,4	25,8	1,0
60	4,4	11,8	16,3	20,2	1,5	1,6	4,6	36,2	23,6	0,8
90	4,3	13,3	13,3	18,4	1,7	1,6	6,5	36,7	28,8	0,7
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	1,6	13,8	20,4	10,9	21,2	23,5	26,6	24,3	11,3	25,7

L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo.

**p<0.01, *p<0.05.

Tabela 4.8 – Alterações nos atributos químicos de solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, após 18 meses da aplicação de gesso agrícola.

Gesso (t ha ⁻¹)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P Mehlich	P Resina	SO ₄ ²⁻	m ⁽¹⁾	Ca:Mg
		-----mmol _c dm ⁻³ -----				-----mg dm ⁻³ -----			%	
Camada de 0–10 cm										
0	4,9	1,0	51,4	29,3	4,6	14,5	26,6	9,3	1,2	1,8
2	4,9	0,7	56,4	23,1	4,2	17,4	27,2	11,2	0,8	2,5
4	4,9	0,7	56,7	24,3	4,2	18,2	27,8	10,9	0,8	2,4
6	5,0	0,7	60,8	18,3	3,7	18,0	27,6	12,9	0,8	3,4
Efeito	L**	ns	L**	L**	L**	L**	ns	L**	42,2	L**
CV (%)	1,7	31,7	9,3	17,4	10,6	16,0	12,9	20,4	ns	22,8
Camada de 10–20 cm										
0	4,6	9,4	26,0	16,6	2,9	3,4	9,6	11,8	17,3	1,6
2	4,5	9,0	26,9	18,7	2,8	3,9	11,5	12,8	15,9	1,5
4	4,5	8,7	26,9	19,5	2,7	3,9	10,6	15,7	15,2	1,4
6	4,6	8,8	30,2	17,8	2,5	4,0	10,2	18,9	15,0	1,7
Efeito	ns	ns	L*	ns	L**	L*	ns	L**	L*	ns
CV (%)	2,5	17,2	13,3	19,2	10,6	20,1	20,5	19,0	21,0	20,2
Camada de 20–40 cm										
0	4,4	13,1	18,3	15,7	2,4	1,9	6,5	15,1	26,5	1,2
2	4,4	12,8	19,3	14,3	1,9	2,1	7,5	19,4	26,7	1,4
4	4,4	12,3	21,9	18,6	2,0	2,6	7,4	31,0	22,8	1,2
6	4,4	11,5	24,5	20,3	1,9	2,4	8,0	39,3	19,8	1,2
Efeito	ns	ns	L**	L**	L**	L**	L*	L**	L**	ns
CV (%)	2,2	21,1	20,6	21,4	17,4	18,4	12,9	29,5	20,5	29,5
Camada de 40–60 cm										
0	4,3	13,6	12,8	18,5	1,4	1,2	5,4	13,4	29,8	0,7
2	4,4	12,6	14,6	18,6	1,5	1,7	6,0	27,8	26,7	0,8
4	4,4	12,1	16,9	19,3	1,4	1,7	5,9	48,5	24,5	0,9
6	4,4	12,5	19,1	20,4	1,6	1,7	6,0	51,3	23,6	1,0
Efeito	ns	ns	L**	L*	L*	L**	ns	L**	L**	L**
CV (%)	1,9	17,1	21,3	12,5	16,0	14,7	33,6	25,1	16,4	22,7

L = efeito linear por análise de regressão; ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

De acordo com o extrator de Mehlich-1, o P no solo foi influenciado pelas doses de gesso em todas as camadas analisadas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm), tendo os seus teores aumentados no solo, após 18 meses da aplicação. Entretanto, a RTA detectou aumento no P do solo com o uso do gesso agrícola somente na camada de 20–40 cm (Tabela 4.8).

4.5.2 Alterações nos atributos radiculares do trigo (2014) e da soja (2014–15)

4.5.2.1 Massa seca de raízes

A massa seca de raízes (MSR) de trigo (2014) não foi influenciada pela interação entre a aplicação de P e de gesso, em nenhuma profundidade amostrada. Na camada de 10–20 cm, observou-se aumento da MSR com a aplicação de 90 kg P_2O_5 ha⁻¹ na semeadura. Nas demais camadas (0–10, 20–40 e 40–60 cm), não houve efeito significativo dos tratamentos sobre a MSR de trigo (2014) (Tabela 4.9).

Para a MSR da soja (2014–15), houve interação entre o P e o gesso apenas na camada mais superficial do solo (0–10 cm). Nessa camada, verificou-se que o gesso, na ausência de P, e vice-versa, resultaram em aumento da MSR. Entretanto, quando houve a aplicação de P e gesso, a MSR foi reduzida. A adição de P, independente do gesso, proporcionou acréscimo na MSR na camada de 10–20 cm, e nas demais camadas não houve efeito dos tratamentos na MSR de soja (Tabela 4.9).

4.5.2.2 Volume de raízes

O volume de raízes de trigo (2014) foi influenciado pela interação entre os tratamentos em todas as camadas amostradas (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). De modo geral, observou-se que, quando aplicados de forma isolada, tanto o P quanto o gesso proporcionam maior volume de raízes. Porém, quando o P e o gesso foram aplicados concomitantes no solo, ocasionaram significativa redução no volume de raízes de trigo em todas as profundidades do solo (Tabela 4.10).

Para a soja (2014–15), observou-se que o volume de raízes foi influenciado pela interação entre os tratamentos apenas na camada mais superficial do solo (0–10 cm). O desdobramento da interação revelou que o volume radicular foi aumentado com a aplicação de gesso sem P e reduzido com a aplicação de P na presença de gesso. Nas demais camadas de solo (10–20, 20–40 e 40–60 cm), não houve influência dos tratamentos no volume de raízes de soja (Tabela 4.10).

Tabela 4.9 – Massa seca (mg dm^{-3}) de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) considerando a aplicação de fósforo no sulco de semeadura e a aplicação de gesso agrícola, após 12 e 18 meses, respectivamente.

após 12 e 18 meses, respectivamente.				
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso		Média	CV (%)
	Sem Gesso	Com 6 t ha ⁻¹⁽¹⁾		
<i>Raízes de trigo (2014)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	220,6	309,9	265,3 a	26,0
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	226,8	211,2	219,0 a	
Média	223,7 A	260,1 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	36,7	51,6	44,1 b	33,0
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	66,0	71,7	68,9 a	
Média	51,4 A	61,7 A		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	19,7	22,9	21,3 a	45,1
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	21,2	9,0	15,1 a	
Média	20,5 A	16,0 A		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	8,3	15,8	12,1 a	69,0
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	26,5	11,7	19,1 a	
Média	17,4 A	13,8 A		
<i>Raízes de soja (2014–15)</i>				
	<i>Camada de 0–10 cm</i>			
Sem P	230,0 Bb	319,3 Aa	274,7	13,1
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	411,9 Aa	226,3 Bb	319,1	
Média	321,0	272,8		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>			
Sem P	61,7	61,2	61,5 b	14,5
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	106,4	89,3	97,9 a	
Média	84,1 A	75,3 A		
	<i>Camada de 20–40 cm</i>			
Sem P	10,4	20,5	15,5 b	19,9
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	42,4	17,5	30,0 a	
Média	26,4 A	19,0 A		
	<i>Camada de 40–60 cm</i>			
Sem P	10,4	16,5	13,5 a	46,9
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	16,3	14,7	15,5 a	
Média	13,4 A	15,6 A		

⁽¹⁾ Gesso agrícola aplicado antes da semeadura. ⁽²⁾ Fósforo aplicado na semeadura na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($P=0,05$).

Tabela 4.10 – Volume ($\text{mm}^3 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) considerando a aplicação de fósforo no sulco de semeadura e a aplicação de gesso agrícola, após 12 e 18 meses, respectivamente.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso		Média	CV (%)
	Sem Gesso	Com 6 t ha ⁻¹⁽¹⁾		
Raízes de trigo (2014)				
	Camada de 0–10 cm			
Sem P	6,48 Bb	8,97 Aa	7,74 a	35,5
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	10,03 Aa	5,42 Bb	7,74 a	
Média	8,26 A	7,20 A		
	Camada de 10–20 cm			
Sem P	4,01 Bb	5,36 Aa	4,75	22,3
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	5,38 Aa	3,63 Bb	4,49	
Média	4,71	4,44		
	Camada de 20–40 cm			
Sem P	2,64 Aa	2,53 Aa	2,40	18,0
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	2,34 Aa	1,56 Bb	1,95	
Média	2,49	2,04		
	Camada de 40–60 cm			
Sem P	2,09 Ab	2,33 Aa	2,21	38,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	2,66 Aa	1,68 Bb	2,17	
Média	2,38	2,00		
Raízes de soja (2014–15)				
	Camada de 0–10 cm			
Sem P	6,17 Ba	8,53 Aa	7,35	36,9
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	8,01 Aa	5,88 Ab	6,94	
Média	7,08	7,21		
	Camada de 10–20 cm			
Sem P	4,55	4,05	4,30 a	15,3
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	4,24	3,76	3,99 a	
Média	4,40 A	3,90 A		
	Camada de 20–40 cm			
Sem P	2,95	3,34	3,14 a	29,6
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	3,26	4,09	3,68 a	
Média	3,11 A	3,72 A		
	Camada de 40–60 cm			
Sem P	3,36	4,07	3,71 a	20,7
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	3,51	4,31	3,91 a	
Média	3,43 A	4,19 A		

⁽¹⁾ Gesso agrícola aplicado antes da semeadura. ⁽²⁾ Fósforo aplicado na semeadura na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($P=0,05$).

4.5.2.3 Área superficial de raízes

Para a área superficial de raízes de trigo (2014), houve interação significativa entre os tratamentos de P e gesso nas camadas mais superficiais (0–10 e 10–20 cm). Nessas camadas, a área superficial de raízes foi maior quando o P e o gesso foram aplicados isoladamente. Porém, com a aplicação de P e gesso houve significativa redução na área superficial de raízes de trigo (2014). Nas demais camadas de solo (20–40 e 40–60 cm), não houve efeito dos tratamentos na área superficial de raízes de trigo (Tabela 4.11).

A área superficial de raízes de soja foi influenciada pela interação entre os tratamentos de P e gesso na camada superficial do solo (0–10 cm). O desdobramento da interação revelou aumento na área superficial das raízes com a aplicação de P sem gesso e de gesso sem P. Porém, com a aplicação de P e gesso, a área superficial das raízes foi diminuída. Nas demais camadas de solo (10–20, 20–40 e 40–60 cm), a área superficial de raízes de soja não foi influenciada pelos tratamentos (Tabela 4.11).

4.5.3.4 Diâmetro médio de raízes

O diâmetro médio de raízes de trigo (2014) e soja (2014–15) não foi influenciado pela interação entre os tratamentos e também pela aplicação isolada de P e gesso, em todas as profundidades amostradas (Tabela 4.12).

Tabela 4.11 – Área superficial ($\text{mm}^2 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) considerando a aplicação de fósforo no sulco de semeadura e a aplicação de gesso agrícola, após 12 e 18 meses, respectivamente.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso		Média	CV (%)
	Sem Gesso	Com 6 t ha ⁻¹⁽¹⁾		
Raízes de trigo (2014)				
	Camada de 0–10 cm			
Sem P	37,60 Bb	49,52 Aa	43,56	26,1
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	52,89 Aa	34,32 Bb	43,60	
Média	45,24	41,92		
	Camada de 10–20 cm			
Sem P	25,41 Bb	31,77 Aa	15,24	19,7
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	31,96 Aa	21,37 Bb	12,45	
Média	26,66	26,58		
	Camada de 20–40 cm			
Sem P	15,78	15,84	15,82 a	23,9
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	13,79	10,18	12,00 a	
Média	14,78 A	13,02 A		
	Camada de 40–60 cm			
Sem P	19,23	14,04	16,65 a	32,8
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	11,07	12,27	11,67 a	
Média	15,16 A	13,16 A		
Raízes de soja (2014–15)				
	Camada de 0–10 cm			
Sem P	32,60 Bb	43,77 Aa	38,20	14,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	44,97 Aa	32,76 Bb	38,85	
Média	38,77	38,27		
	Camada de 10–20 cm			
Sem P	26,12	22,80	24,46 a	11,6
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	24,44	21,78	23,11 a	
Média	25,29 A	21,72 A		
	Camada de 20–40 cm			
Sem P	17,09	17,92	17,52 a	30,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	17,28	23,76	20,52 a	
Média	17,19 A	20,85 A		
	Camada de 40–60 cm			
Sem P	19,87	26,76	23,31 a	27,5
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	25,52	24,02	24,77 a	
Média	22,69 A	25,39 A		

⁽¹⁾ Gesso agrícola aplicado antes da semeadura. ⁽²⁾ Fósforo aplicado na semeadura na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p=0,05$).

Tabela 4.12 – Diâmetro médio (mm) de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) considerando a aplicação de fósforo no sulco de semeadura e a aplicação de gesso agrícola, após 12 e 18 meses, respectivamente.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso		Média	CV (%)
	Sem Gesso	Com 6 t ha ⁻¹⁽¹⁾		
Raízes de trigo (2014)				
	Camada de 0–10 cm			
Sem P	1,43	1,53	1,48 a	9,5
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,62	1,57	1,59 a	
Média	1,52 A	1,55 A		
	Camada de 10–20 cm			
Sem P	1,07	1,20	1,13 a	12,9
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,23	1,31	1,27 a	
Média	1,14 A	1,25 A		
	Camada de 20–40 cm			
Sem P	1,07	1,11	1,09 a	15,3
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,16	0,91	1,03 a	
Média	1,12 A	1,01 A		
	Camada de 40–60 cm			
Sem P	0,93	1,07	1,00 a	20,9
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	0,91	0,98	0,94 a	
Média	0,92 A	1,02 A		
Raízes de soja (2014–15)				
	Camada de 0–10 cm			
Sem P	1,69	1,75	1,72 a	8,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,52	1,65	1,59 a	
Média	1,60 A	1,70 A		
	Camada de 10–20 cm			
Sem P	1,38	1,28	1,33 a	6,6
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,24	1,34	1,29 a	
Média	1,36 A	1,31 A		
	Camada de 20–40 cm			
Sem P	1,20	1,33	1,27 a	18,5
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,30	1,29	1,29 a	
Média	1,25 A	1,31 A		
	Camada de 40–60 cm			
Sem P	1,22	1,39	1,30 a	31,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	1,28	1,22	1,25 a	
Média	1,25 A	1,30 A		

⁽¹⁾ Gesso agrícola aplicado antes da semeadura. ⁽²⁾ Fósforo aplicado na semeadura na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

4.5.2.5 Densidade de comprimento de raízes

A densidade de comprimento de raízes (DCR) de trigo (2014) foi significativamente influenciada pela interação entre os tratamentos, em todas as camadas de solo avaliadas. Observou-se que a DCR de trigo foi maior no tratamento que recebeu apenas o P e naquele onde foi aplicado apenas o gesso. Entretanto, no tratamento com P ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) e gesso (6 t ha^{-1}), houve significativa redução na DCR de trigo, em todas as profundidades do solo (Tabela 4.13).

Para a soja (2014–15), a DCR foi influenciada pela interação entre os tratamentos apenas na camada de 0–10 cm. O desdobramento, nessa camada de solo, mostrou que houve aumento na DCR de soja com a aplicação de P sem gesso e com a aplicação de gesso sem P. Porém, a DCR foi reduzida no tratamento com P ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) e gesso (6 t ha^{-1}). Nas demais camadas amostradas (10–20, 20–40 e 40–60 cm), os efeitos dos tratamentos foram independentes. Na camada de 10–20 cm, a DCR foi maior com as aplicações isoladas de P e de gesso, enquanto nas camadas de 20–40 e 40–60 cm não houve efeito significativo dos tratamentos (Tabela 4.13).

Tabela 4.13 – Densidade de comprimento (m dm^{-3}) de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) considerando a aplicação de fósforo no sulco de semeadura e a aplicação de gesso agrícola, após 12 e 18 meses, respectivamente.

Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Gesso		Média	CV (%)
	Sem Gesso	Com 6 t ha ⁻¹⁽¹⁾		
Raízes de trigo (2014)				
	Camada de 0–10 cm			
Sem P	94,5 Bb	151,2 Aa	122,9	21,7
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	126,0 Aa	108,8 Bb	117,5	
Média	110,3	130,0		
	Camada de 10–20 cm			
Sem P	17,2 Bb	62,3 Aa	39,7	35,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	48,8 Aa	34,1 Bb	41,5	
Média	33,0	48,2		
	Camada de 20–40 cm			
Sem P	9,2 Aa	13,1 Aa	11,2	39,9
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	13,6 Ab	5,2 Bb	9,3	
Média	11,4	9,3		
	Camada de 40–60 cm			
Sem P	3,7 Ab	10,0 Aa	6,8	49,4
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	20,3 Aa	5,0 Ba	12,5	
Média	12,0	7,5		
Raízes de soja (2014–15)				
	Camada de 0–10 cm			
Sem P	58,1 Bb	88,7 Aa	73,3	19,3
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	87,2 Aa	50,5 Bb	68,9	
Média	72,5	69,6		
	Camada de 10–20 cm			
Sem P	12,3	21,4	1,7,0 b	17,8
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	24,5	31,6	2,8,2 a	
Média	18,5 B	26,6 A		
	Camada de 20–40 cm			
Sem P	3,9	5,9	0,49 a	15,9
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	5,1	5,6	0,53 a	
Média	4,5 A	5,8 A		
	Camada de 40–60 cm			
Sem P	2,9	4,4	0,3,7 a	44,2
Com 90 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹⁽²⁾	3,9	4,1	0,4,1 a	
Média	3,3 A	4,3 A		

⁽¹⁾ Gesso agrícola aplicado antes da semeadura. ⁽²⁾ Fósforo aplicado na semeadura na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($P=0,05$).

4.5.2.6 Comprimento radicular total por área

A interação entre os tratamentos foi significativa para o comprimento radicular por área (CRA) do trigo, até a profundidade de 60 cm (Figura 4.2a). Observa-se, através do desdobramento, que o CRA aumentou quando o P e o gesso foram aplicados de maneira isolada. Porém, o tratamento que recebeu P e gesso promoveu significativa redução do CRA do trigo. Para a soja, não houve interação entre os tratamentos e os efeitos do P e do gesso no CRA foram independentes. A adição de P na semeadura da soja proporcionou aumento no CRA da soja, enquanto o gesso não influenciou essa variável (Figura 4.2b). Calculando-se as médias dos tratamentos para o CRA do trigo (2014) e da soja (2014–15), obteve-se valores de comprimento, até 60 cm de profundidade, de 208 cm cm⁻² e 113 cm cm⁻², respectivamente.

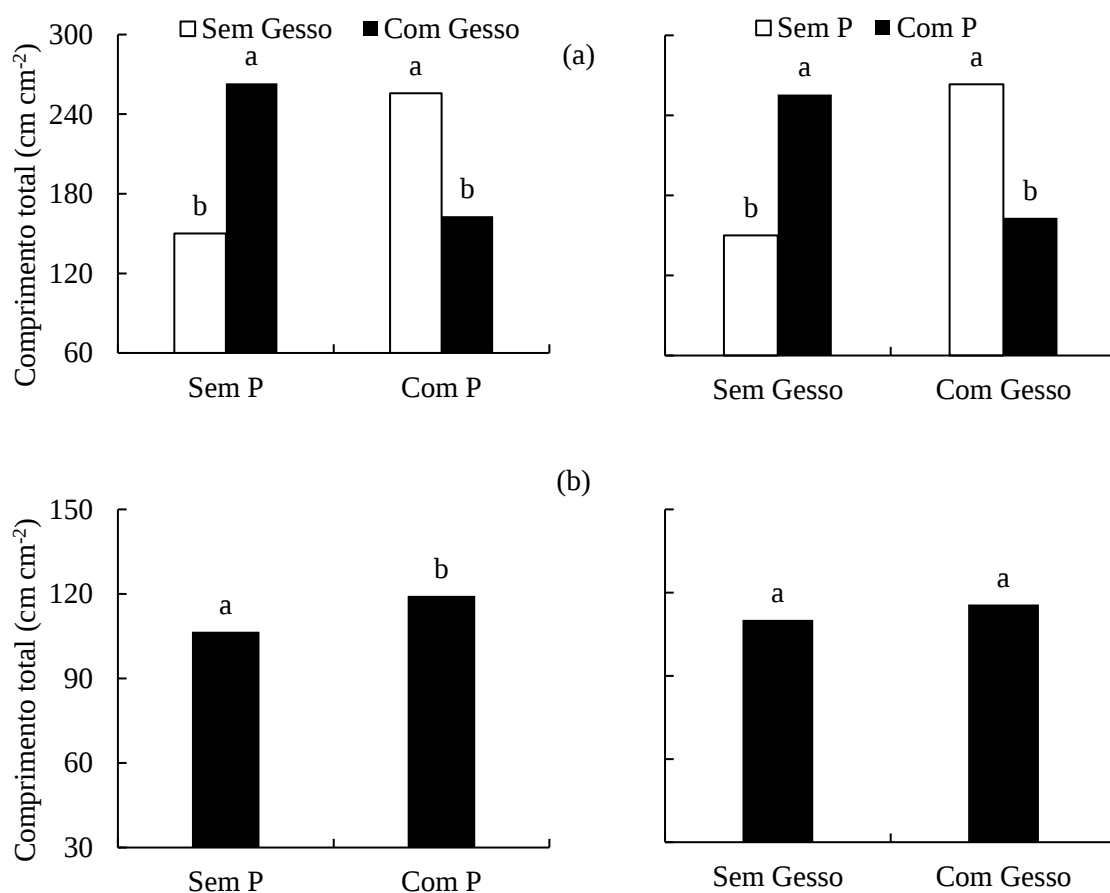


Figura 4.2 – Comprimento total por área (cm cm⁻²) de raízes de trigo (a) e de soja ((b) na profundidade de 0–60 cm, após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura (90 kg P₂O₅ ha⁻¹), e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola (6 t ha⁻¹), respectivamente. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

Os coeficientes de correlação entre atributos de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15), e os atributos químicos do solo são mostrados na Tabela 4.14. Destaca-se que a DCR do trigo se correlacionou negativamente com a m% nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–40 cm. Por outro lado, ocorreram correlações positivas entre a DCR do trigo e os teores de Ca^{2+} na camada de 0–10 cm, e o P extraído por Mehlich-1 nas camadas de 0–10 e 10–20 cm (Tabela 4.14). Para a soja ocorreu correlação negativa entre a DCR e a m% apenas na camada mais superficial do solo (0–10 cm). Todavia, houve correlação positiva entre a DCR da soja e os teores de Ca^{2+} na camada de 0–10 cm, o P extraído com solução de Mehlich-1 nas camadas de 0–10, 10–20 e 40–60 cm, o P extraído pela RTA na camada de 20–40 cm e o SO_4^{2-} na camada de 10–20 cm (Tabela 4.14).

O CRA até a profundidade de 60 cm de trigo e soja foram correlacionados de forma negativa com a m%. Por outro lado, observaram-se correlações positivas entre o CRA das duas culturas e o teor de Ca^{2+} no solo. Para a soja, também houve correlação positiva entre o CRA e o teor de P (Mehlich-1) no solo (Tabela 4.14).

Tabela 4.14 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes de trigo (2014) e de soja (2014–15) e atributos químicos do solo em diferentes profundidades.

Camada ----cm----	m%	Ca^{2+} ----mmol _c dm ⁻³ ----	Mg^{2+}	Ca:Mg	P Mehlich-1 -----mg dm ⁻³ -----	P Resina	SO_4^{2-}
<i>Trigo (2014)</i>							
<i>Densidade de comprimento (m dm⁻³)</i>							
0–10	-0,48*	0,47*	-0,17 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,46*	0,08 ^{ns}	0,11 ^{ns}
10–20	-0,53*	0,27 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,56**	0,19 ^{ns}	0,22 ^{ns}
20–40	-0,56**	-0,18 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,08 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	0,29 ^{ns}	-0,28 ^{ns}
40–60	-0,34 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	-0,41 ^{ns}	-0,27 ^{ns}
<i>Comprimento total por área (cm cm⁻²)</i>							
0–60	-0,58**	0,46*	0,06 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,45*	0,05 ^{ns}	0,15 ^{ns}
<i>Soja (2013–14)</i>							
<i>Densidade de comprimento (m dm⁻³)</i>							
0–10	-0,53*	0,48*	0,13 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,47*	0,10 ^{ns}	0,30 ^{ns}
10–20	-0,00 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,61**	0,10 ^{ns}	0,67**
20–40	-0,21 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,55*	0,02 ^{ns}
40–60	-0,26 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,48*	0,06 ^{ns}	0,38 ^{ns}
<i>Comprimento radicular por área (cm cm⁻²)</i>							
0–60	-0,52*	0,55**	0,33 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,49*	0,43 ^{ns}	0,41 ^{ns}

ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

4.5.3 Diagnose nutricional do trigo (2014) e da soja (2014–15)

Não houve interação entre as doses de P e as doses de gesso para a diagnose foliar do trigo (2014) e da soja (2014–15). Para o trigo (2014), as doses de P aumentaram linearmente a concentração de Mg e Mn nas folhas. Já, para a soja (2014–15), o incremento nas doses de P ocasionou aumento linear na concentração de P e quadrático na concentração de Mn. Tanto para o trigo como para a soja, as doses de P reduziram de forma linear a concentração de Zn foliar (Tabela 4.15).

Após 12 meses da aplicação, as doses de gesso agrícola ocasionaram aumento linear nas concentrações de Ca, S, Cu, Fe e Mn nas folhas de trigo. Para a soja, após 18 meses da aplicação, as doses de gesso aumentaram linearmente as concentrações foliares de P, Ca, Fe e Mn. Também foi observada redução na concentração de Mg nas folhas de soja com as doses de gesso aplicadas (Tabela 4.15).

Tabela 4.15 – Concentrações de nutrientes nas folhas de trigo (2014) e soja (2014–15) após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola, respectivamente.

	gesso agrícola, respectivamente.									
Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----				
Trigo (2014)										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	42,8	2,5	21,9	5,2	1,7	3,3	10,9	135	74,9	30,5
30	41,8	2,5	19,7	5,7	1,9	3,3	11,5	143	78,1	30,4
60	38,6	2,5	20,8	5,4	1,9	3,1	11,0	127	70,7	30,0
90	42,4	2,7	20,8	5,9	1,9	3,4	11,3	132	91,0	28,0
Efeito	ns	ns	ns	ns	L*	ns	ns	ns	L**	L*
CV (%)	12,0	10,0	9,6	17,3	11,8	11,2	20,2	13,7	6,3	9,0
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	42,1	2,4	20,7	4,7	1,9	2,2	10,8	130	69,0	29,4
2	41,9	2,5	20,8	5,4	1,9	3,1	10,7	130	78,2	29,5
4	41,9	2,6	21,1	5,7	1,8	3,6	11,3	136	84,8	30,7
6	43,4	2,4	20,6	6,6	1,8	4,1	11,9	142	82,6	29,0
Efeito	ns	ns	ns	L*	ns	L**	L*	L*	L**	ns
CV (%)	12,2	13,1	6,7	9,7	9,5	12,5	10,6	8,6	14,4	7,5
Soja (2014–15)										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	53,1	4,2	35,3	5,7	2,9	2,2	8,8	137	29,7	36,5
30	56,0	4,3	33,8	6,0	3,0	2,4	9,5	148	42,1	36,7
60	52,9	4,5	36,0	5,7	2,9	2,0	8,5	130	36,3	35,1
90	48,8	4,6	35,0	5,6	2,8	2,2	8,9	132	31,8	33,7
Efeito	ns	L*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	Q**	L*
CV (%)	21,3	7,8	11,3	12,1	8,1	15,9	11,0	14,7	10,2	5,4
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	53,0	4,2	34,6	5,5	3,0	2,0	8,9	128	28,8	35,4
2	50,3	4,4	34,7	5,7	2,9	2,2	8,9	138	30,0	35,7
4	54,0	4,5	35,6	5,8	2,8	2,4	8,9	140	31,3	36,2
6	53,6	4,5	35,2	5,9	2,7	2,2	8,9	140	50,0	35,8
Efeito	ns	L*	ns	L*	L*	ns	ns	L*	L**	ns
CV (%)	18,5	7,7	5,7	10,0	7,3	16,4	7,9	8,5	8,4	5,6

L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo.

**p<0.01, *p<0.05.

4.5.4 Extração e exportação de nutrientes pelo trigo (2014) e pela soja (2014–15)

A análise de variância não revelou interação significativa entre os tratamentos para a extração de nutrientes pelas culturas de trigo (2014) e soja (2014–15) (Tabela 4.16). Para o trigo, as doses de P aumentaram de forma quadrática as extrações de N, P e Zn. Já, para a soja (2014–15), o incremento nas doses de P promoveu aumento quadrático nas extrações de N, P, S e Mn. Todavia, a extração de Zn pela soja foi significativamente reduzida com o aumento das doses de P.

Após 12 meses da aplicação de gesso, observou-se que o incremento nas doses de gesso promoveu aumento linear nas extrações de Ca e S, e quadrático nas extrações de P, Mg, Cu e Fe pelas plantas de trigo. Para a soja, as doses de gesso, após 18 meses, aumentaram linearmente as extrações de P, K, Ca, S e Mn, e de forma quadrática as extrações de N, Cu e Zn (Tabela 4.16).

Não houve interação significativa entre os tratamentos para as exportações de nutrientes pelos grãos de trigo (2014) e soja (2014–15). Os efeitos independentes dos tratamentos podem ser mostrados na Tabela 4.17. O incremento de doses de P na semeadura do trigo promoveu aumento linear nas exportações de N, P e Mg, e quadrático nas exportações de S, Fe e Zn. Porém, para a soja, as doses de P na semeadura ocasionaram aumento quadrático nas exportações de todos os nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn).

Após 12 meses da aplicação, as doses de gesso agrícola aumentaram linearmente as exportações de P e S pelos grãos de trigo, e após 18 meses da aplicação, as doses de gesso promoveram aumento linear nas exportações de Ca, S, Fe e Zn, e quadrático nas exportações de N e P pelos grãos de soja (Tabela 4.17).

As equações de regressão para a extração e exportação de nutrientes pelas culturas de trigo e soja, considerando os efeitos independentes das doses de P e de gesso agrícola, encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 4.18 e 4.19.

Tabela 4.16 – Extração de nutrientes pelas culturas de trigo (2014) e soja (2014–15) após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola, respectivamente.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----kg ha ⁻¹ -----						-----g ha ⁻¹ -----			
Trigo (2014)										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	97,2	8,1	188,8	18,9	9,9	12,3	68,8	1.278	854	242
30	121,7	10,5	205,3	21,5	11,3	13,8	91,2	1.703	886	266
60	122,7	11,6	185,0	19,8	10,4	13,3	83,2	1.386	731	295
90	102,9	9,6	212,8	23,2	10,9	13,5	84,5	1.496	801	220
Efeito	Q*	Q*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	Q*
CV (%)	20,5	23,4	25,8	17,8	16,2	20,6	30,8	20,3	23,9	27,1
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	105,5	8,8	181,4	14,9	9,9	9,8	75,1	1.089	722	217
2	100,1	9,5	214,9	22,0	11,1	13,0	97,1	1.903	905	297
4	129,4	12,3	201,8	22,6	11,5	15,0	89,2	1.357	838	199
6	110,4	9,2	193,7	21,8	9,9	15,1	76,2	1.513	807	228
Efeito	ns	Q*	ns	L*	Q*	L**	Q*	Q*	ns	ns
CV (%)	21,3	29,2	20,1	25,2	24,2	22,8	19,6	31,0	26,9	33,0
Soja (2014–15)										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	268,1	30,4	307,3	62,8	37,9	9,8	74,2	1.564	321	232
30	276,4	32,0	305,7	63,9	36,8	9,9	76,2	1.481	431	225
60	281,6	36,1	344,1	66,8	40,8	11,1	82,6	1.720	414	214
90	257,7	34,1	315,2	63,1	36,5	9,9	79,6	1.553	323	211
Efeito	Q*	Q*	ns	ns	ns	Q*	ns	ns	Q**	L*
CV (%)	8,9	14,1	10,7	16,4	11,2	7,8	11,4	22,0	9,1	6,1
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	233,1	29,3	288,6	54,6	36,0	7,6	70,3	1.484	282	197
2	269,1	32,0	320,9	65,5	37,2	10,6	78,1	1.638	318	216
4	304,0	36,9	331,9	65,9	41,0	11,2	86,5	1.594	349	255
6	277,7	34,3	330,9	70,7	37,6	11,1	77,7	1.602	540	214
Efeito	Q**	L**	L*	L**	ns	L**	Q*	ns	L**	Q**
CV (%)	10,7	14,0	13,9	15,1	14,8	13,8	15,8	19,8	12,4	14,1

L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo.

**p<0.01, *p<0.05.

Tabela 4.17 – Exportação de nutrientes pelos grãos de trigo (2014) e soja (2014–15) após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola, respectivamente.

	Gesso agrícola, respectivamente:									
Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----kg ha ⁻¹ -----					-----g ha ⁻¹ -----				
<i>Trigo (2014)</i>										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	100,6	11,3	19,3	1,3	4,6	4,9	36,5	355	223	174
30	104,9	12,6	19,7	1,7	4,9	5,0	37,5	671	235	179
60	105,8	12,6	20,0	1,4	4,9	6,0	38,5	670	224	172
90	112,5	12,7	20,5	1,4	5,5	4,9	38,1	538	215	170
Efeito	L*	L*	ns	ns	L*	Q*	ns	Q*	ns	Q*
CV (%)	7,9	14,3	23,8	27,9	19,2	19,7	16,6	37,9	21,2	13,8
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	105,7	11,7	19,9	1,3	5,1	4,7	37,8	449	226	181
2	105,9	11,9	19,3	1,6	4,7	5,0	36,0	559	218	168
4	106,5	12,8	20,0	1,5	5,1	5,1	39,0	645	232	180
6	105,7	12,9	20,3	1,5	5,0	6,1	37,7	581	221	178
Efeito	ns	L*	ns	ns	ns	L*	ns	ns	ns	ns
CV (%)	9,1	14,8	12,0	20,6	12,7	23,7	12,3	41,8	11,6	10,2
<i>Soja (2014–15)</i>										
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)										
0	230,4	16,2	94,7	7,3	11,0	6,8	63,0	473	116	162
30	226,9	19,4	97,0	7,3	11,3	9,7	65,1	537	119	166
60	256,7	20,5	108,7	8,2	12,7	7,6	71,0	528	132	181
90	226,7	18,1	92,9	7,2	11,0	6,4	62,8	526	111	159
Efeito	Q*	Q*	Q**	Q*	Q**	Q*	Q*	Q*	Q*	Q*
CV (%)	11,5	13,8	7,0	6,2	6,4	12,9	8,8	22,3	6,9	8,2
Gesso (t ha ⁻¹)										
0	220,0	17,5	99,6	7,3	11,4	6,2	62,7	483	116	162
2	251,1	18,5	96,6	7,3	11,5	6,7	66,0	486	120	167
4	246,9	20,0	99,9	7,6	11,5	7,3	66,4	569	124	169
6	222,8	18,3	97,3	7,7	11,6	7,2	66,8	526	117	170
Efeito	Q*	Q*	ns	L*	ns	L*	ns	L*	ns	L*
CV (%)	17,9	18,2	14,9	12,6	12,4	14,1	12,3	17,2	11,4	12,5

L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo.

**p<0.01, *p<0.05.

Tabela 4.18 – Equações de regressão ajustadas para extração e exportação de nutrientes pelas culturas de trigo (2014) e soja (2014–15), considerando as doses de fósforo aplicadas na semeadura.

Nutriente	Cultura	Regressão para Extração	R ²	Regressão para Exportação	R ²
	a				
N (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = 97 + 1,17x - 0,0123x^2$	1,00	$\hat{y} = 100,5 + 0,122x$	0,92
	Soja	$\hat{y} = 267 + 0,72x - 0,009x^2$	0,90	$\hat{y} = 226 + 0,72x - 0,0074x^2$	0,31
P (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = 8,0 + 0,13x - 0,0012x^2$	0,98	$\hat{y} = 11,7 + 0,014x$	0,66
	Soja	$\hat{y} = 30 + 0,14x - 0,0001x^2$	0,80	$\hat{y} = 16,1 + 0,16x - 0,0016x^2$	0,99
K (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 198$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 20$	-
	Soja	$\hat{y} = \bar{y} = 318$	-	$\hat{y} = 93 + 0,47x - 0,005x^2$	0,55
Ca (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 21$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 1,5$	-
	Soja	$\hat{y} = \bar{y} = 64$	-	$\hat{y} = 7,2 + 0,03x - 0,0003x^2$	0,41
Mg (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 11$	-	$\hat{y} = 4,6 + 0,009x$	0,85
	Soja	$\hat{y} = \bar{y} = 38$	-	$\hat{y} = 11 + 0,55x - 0,0006x^2$	0,56
S (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 13$	-	$\hat{y} = 4,8 + 0,033x - 0,0003x^2$	0,48
	Soja	$\hat{y} = 9,6 + 0,04x - 0,0004x^2$	0,47	$\hat{y} = 7,1 + 0,09x - 0,0011x^2$	0,73
Cu (g ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 82$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 38$	-
	Soja	$\hat{y} = \bar{y} = 78$	-	$\hat{y} = 62 + 0,28x - 0,0029x^2$	0,64
Fe (g ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 1466$	-	$\hat{y} = 364 + 13x - 0,0124x^2$	0,90
	Soja	$\hat{y} = \bar{y} = 1580$	-	$\hat{y} = 477 + 2,1x - 0,0183x^2$	0,87
Mn (g ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 818$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 224$	-
	Soja	$\hat{y} = 324 + 5,0x - 0,056x^2$	0,99	$\hat{y} = 114 + 0,59x - 0,0067x^2$	0,60
Zn (g ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = 237 + 2,4x - 0,028x^2$	0,81	$\hat{y} = 175 + 0,112x - 0,002x^2$	0,68
	Soja	$\hat{y} = 232 - 0,247x$	0,96	$\hat{y} = 160 + 0,67x - 0,0072x^2$	0,60

Tabela 4.19 – Equações de regressão ajustadas para extração e exportação de nutrientes pelas culturas de trigo (2014) e soja (2014–15), após 12 e 18 meses da aplicação das doses de gesso agrícola, respectivamente.

Nutriente	Cultura	Regressão para Extração	R ²	Regressão para Exportação	R ²
N (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 111$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 106$	-
	Soja	$\hat{y} = 230+31,8x-3,9x^2$	0,93	$\hat{y} = 221+20,9x-3,45x^2$	0,99
P (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = 8,4+1,6x-0,238x^2$	0,58	$\hat{y} = 11,7+0,225x$	0,90
	Soja	$\hat{y} = 29+3,0x-0,33x^2$	0,85	$\hat{y} = 17,3+1,2x-0,17x^2$	0,79
K (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 198$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 20$	-
	Soja	$\hat{y} = 297+6,895x$	0,77	$\hat{y} = \bar{y} = 98$	-
Ca (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = 17,1+1,07x$	0,58	$\hat{y} = \bar{y} = 1,5$	0,82
	Soja	$\hat{y} = 57+2,435x$	0,85	$\hat{y} = 7,3+0,075x$	0,88
Mg (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = 9,8+1,07x-0,175x^2$	0,96	$\hat{y} = \bar{y} = 5,0$	0,93
	Soja	$\hat{y} = \bar{y} = 38$	0,93	$\hat{y} = \bar{y} = 12$	0,79
S (kg ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = 10,5+0,895x$	0,87	$\hat{y} = 4,6+0,215x$	0,83
	Soja	$\hat{y} = 8,5+0,555x$	0,71	$\hat{y} = 6,31+0,18x$	0,84
Cu (g ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = 76+12,9-2,19x^2$	0,91	$\hat{y} = \bar{y} = 38$	-
	Soja	$\hat{y} = 69+7,76x-1,04x^2$	0,89	$\hat{y} = \bar{y} = 66$	-
Fe (g ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = 1192+283x-41,1x^2$	0,39	$\hat{y} = \bar{y} = 559$	-
	Soja	$\hat{y} = \bar{y} = 1580$	-	$\hat{y} = 484,2+10,6x$	0,46
Mn (g ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 818$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 224$	-
	Soja	$\hat{y} = 252+40,25x$	0,81	$\hat{y} = \bar{y} = 119$	-
Zn (g ha ⁻¹)	Trigo	$\hat{y} = \bar{y} = 235$	-	$\hat{y} = \bar{y} = 177$	-
	Soja	$\hat{y} = 192+27x-3,74x^2$	0,72	$\hat{y} = 163+1,3x$	0,90

4.5.5 Produção de massa seca e rendimento de grãos de trigo (2014) e soja (2014–15)

Não houve interação entre os tratamentos, e também não foram observados efeitos isolados das doses de P e das doses de gesso para a produção de massa seca (MS) do trigo (2014) e da soja (2014–15) (Figura 4.3). As médias de produção de MS foram de 10.602 kg ha⁻¹ de trigo, e 10.537 kg ha⁻¹ de soja.

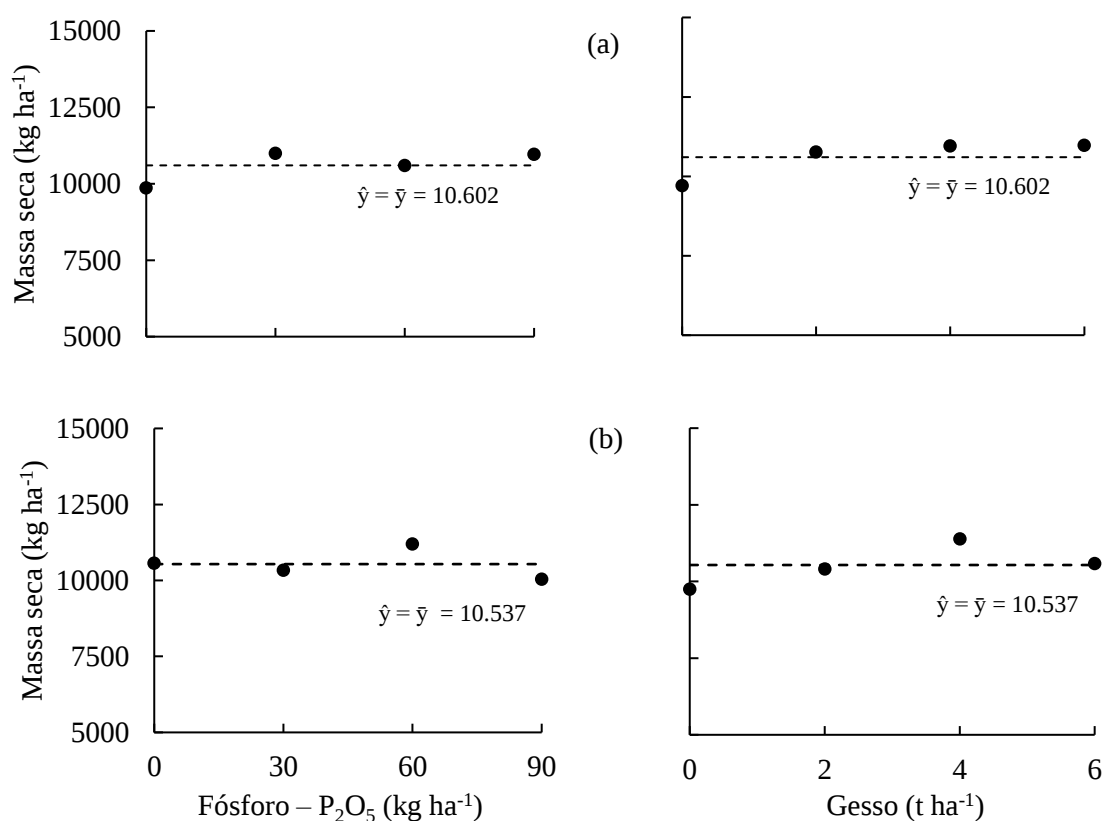


Figura 4.3 – Produção de massa seca de trigo (2014) (a) e soja (2014–15) (b) após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola, respectivamente. (●) = Efeitos médios dos tratamentos.

Interação significativa entre os tratamentos foi observada para o rendimento de grãos de trigo (2014), enquanto que para o rendimento de grãos da soja (2014–15), os efeitos foram independentes (Figura 4.4a,b).

Para o trigo (2014), o incremento nas doses de P, na ausência de gesso, ocasionou aumento linear no rendimento de grãos. Já, na dose de 2 t ha⁻¹ de gesso, o acréscimo das doses de P aumentou de forma quadrática o rendimento de grãos. Neste caso, a produtividade máxima, de 4.928 kg ha⁻¹, seria obtida com a dose de 59 kg P₂O₅ ha⁻¹. Porém, nas maiores

doses de gesso (4 e 6 t ha⁻¹), o incremento nas doses de P não influenciou o rendimento de grãos de trigo (Figura 4.4a). Considerando o incremento nas doses de gesso, nota-se que, na ausência de P, houve aumento linear no rendimento de grãos de trigo. Já, nas doses de 30 e 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, o aumento nas doses de gesso não alterou o rendimento de grãos, tendo-se obtido produtividades médias de 4.642 e 4.737 kg ha⁻¹, respectivamente. Porém, na maior dose de P (90 kg P₂O₅ ha⁻¹), verificou-se que o aumento nas doses de gesso reduziu linearmente o rendimento de grãos de trigo (Figura 4.4a).

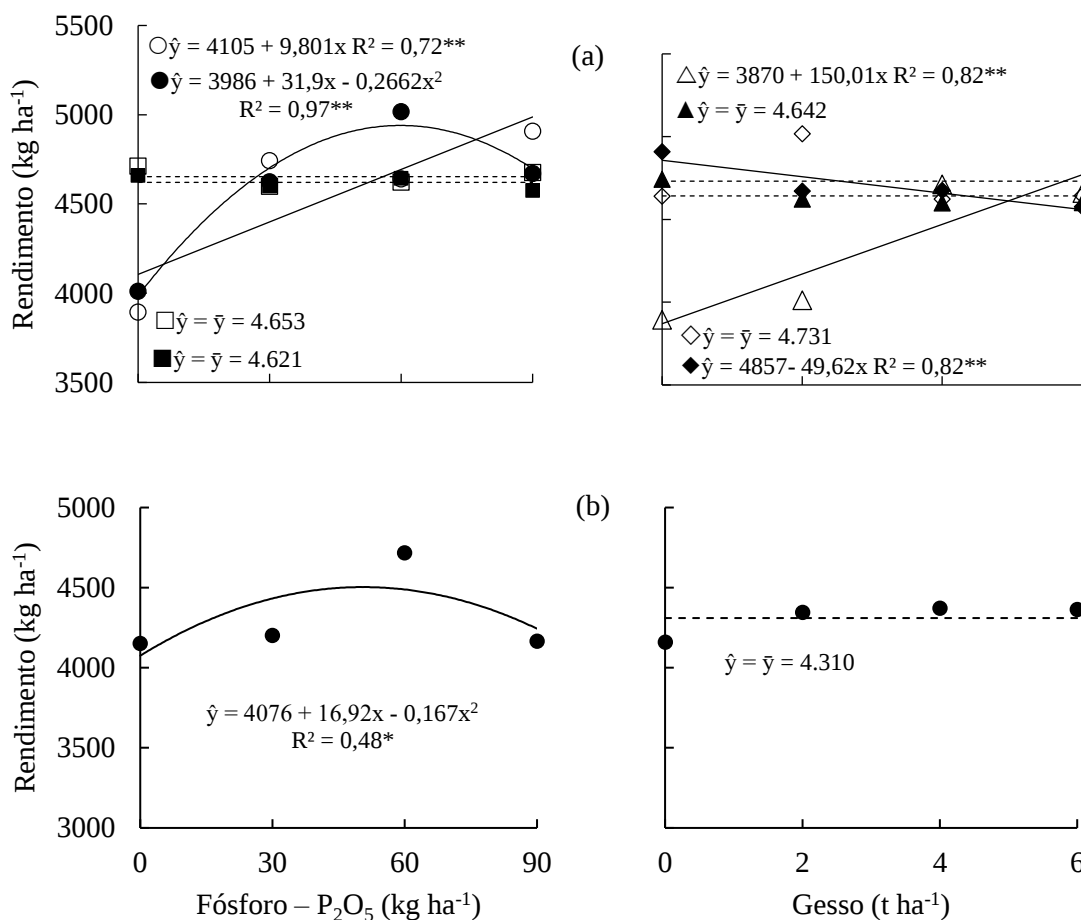


Figura 4.4 – Rendimento de grãos de trigo (2014) (a) e soja (2014–15) (b) após a aplicação de fósforo (△0, ▲30, ◇60 e ◆90 kg ha⁻¹) no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola (○0, ●2, □4 e ■6 t ha⁻¹), respectivamente. (●) = Efeitos médios dos tratamentos para soja. $^{**}p < 0.01$ e $^*p < 0.05$.

Para a soja (2014–15), o incremento nas doses de P ocasionou aumento quadrático no rendimento de grãos, obtendo-se máxima produtividade, de 4.497 kg ha⁻¹, com a dose de 50 kg P₂O₅ ha⁻¹. Por outro lado, as doses de gesso não influenciaram o rendimento de grãos de soja, com média de produtividade de 4.310 kg ha⁻¹ (Figura 4.4b).

As correlações entre o rendimento de grãos de trigo (2014) e soja (2014–15) e a extração de nutrientes pelas culturas foram baixas e não significativas. Os coeficientes de correlação entre o rendimento de grãos de trigo e soja e a exportação dos nutrientes pelas culturas estão apresentados na Tabela 4.20. Para o trigo, com exceção da exportação de Ca, houve correlação positiva entre o rendimento de grãos e a exportação dos demais nutrientes avaliados (N, P, K, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn). As correlações mais estreitas foram obtidas entre o rendimento de grãos e as exportações de N e P. Para a soja, o rendimento de grãos se correlacionou positivamente com a todos os nutrientes exportados. Destaca-se que correlações altamente significativas foram obtidas entre o rendimento de grãos de soja e as exportações de Ca, Mg, Cu, Mn e Zn.

Tabela 4.20 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a exportação de nutrientes e o rendimento de grãos de trigo (2014) e soja (2014–15).

Cultura	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
<i>Rendimento de grãos (kg ha⁻¹)</i>										
Trigo (2014)	0,66**	0,62**	0,49**	0,22 ^{ns}	0,54**	0,36*	0,49**	0,38*	0,33*	0,52**
Soja (2014–15)	0,48**	0,59**	0,75**	0,86**	0,93**	0,73**	0,92**	0,43**	0,88**	0,93**

ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

Correlações positivas foram observadas entre o rendimento de grãos de trigo (2014) e de soja (2014–15), e a densidade de comprimento de raízes (DCR). Para o trigo, correlações significativas foram observadas nas camadas de solo de 0–10 e 40–60 cm, e para a soja, na camada mais superficial (0–10 cm). Além disso, o comprimento total das raízes por área (0–60 cm), tanto de trigo como de soja, também foi correlacionado positivamente com o rendimento de grãos (Tabela 4.21).

Tabela 4.21 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes de trigo (2014) e soja (2014–15) e o rendimento de grãos em diferentes profundidades.

Camada ----cm----	Rendimento de grãos de trigo -----kg ha ⁻¹ -----	Rendimento de grãos de soja -----kg ha ⁻¹ -----
<i>Densidade de comprimento (m dm⁻³)</i>		
0–10	0,54*	0,62*
10–20	0,35 ^{ns}	0,20 ^{ns}
20–40	0,25 ^{ns}	0,11 ^{ns}
40–60	0,65*	0,03 ^{ns}
<i>Comprimento radicular por área (cm cm⁻²)</i>		
0–60	0,59*	0,51*

ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

4.5.6 Eficiências de aproveitamento de fósforo pelo trigo (2014) e pela soja (2014–15)

Não houve interação entre as doses de P e as doses de gesso para as eficiências de aproveitamento de P pelo trigo (2014) e pela soja (2014–15). Os efeitos médios dos tratamentos podem ser observados na Tabela 4.22.

Para o trigo (2014), as maiores doses de P (60 e 90 kg P₂O₅ ha⁻¹) causaram redução na eficiência agrônômica (EA), na eficiência fisiológica (EF) e na eficiência agrofisiológica (EAF) da cultura. A dose de 90 kg P₂O₅ ha⁻¹ proporcionou os menores valores de eficiência na recuperação aparente (ERA) e de eficiência de uso de P (EUP). O FPP do trigo foi maior diante da aplicação de 30 kg P₂O₅ ha⁻¹, sendo reduzido em 49% com a dose de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ e em 66% com a dose de 90 kg P₂O₅ ha⁻¹. Observou-se que, após 12 meses da aplicação, as doses de gesso aumentaram, conforme o modelo quadrático, a EF [$\hat{y} = 261,9 + 132,6x - 23,8x^2$; R² = 0,70], a EAF [$\hat{y} = 227,9 + 139,2x - 28,8x^2$; R² = 0,49] e a EUP [$\hat{y} = 15,1 + 9,4x - 0,93x^2$; R² = 0,56]. A derivada das equações demonstrou que a máxima EF, de 447 kg kg⁻¹, seria obtida com a dose de 2,8 t ha⁻¹ de gesso; a máxima EAF, de 396 kg kg⁻¹, com a dose de 2,4 t ha⁻¹ de gesso; e a máxima EUP, de 39 kg kg⁻¹, com a aplicação de 5 t ha⁻¹ de gesso.

Para a soja (2014–15), a maior dose de P (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) ocasionou redução na EA, na EF, na ERA e na EUP. Para a EAF, a dose de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ foi a que proporcionou o melhor resultado. O maior FPP foi obtido com a menor dose de P (30 kg P₂O₅ ha⁻¹), tendo ocorrido redução no FPP com o aumento da dose de P. Nesse caso, o aumento de 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ para 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ ocasionou redução de 43% no FPP, e o aumento de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ para 90 kg P₂O₅ ha⁻¹ reduziu o FPP em mais 41%.

A EA da soja (2014–15) aumentou de forma linear, enquanto a EF [$\hat{y} = 134,1 + 95,8x - 11,5x^2$; $R^2 = 0,82$], a EAF [$\hat{y} = 38,8 + 57,1x - 9,7x^2$; $R^2 = 0,98$], a ERA [$\hat{y} = 0,13 + 0,039x - 0,005x^2$; $R^2 = 0,53$] e a EUP [$\hat{y} = 11,6 + 3,2x - 0,37x^2$; $R^2 = 0,67$] aumentaram de forma quadrática, com as doses de gesso aplicadas, após 18 meses. Considerando as equações de regressão ajustadas, a máxima EF, de 334 kg kg⁻¹, seria obtida com a dose de 4,2 t ha⁻¹ de gesso; a máxima EAF, de 123 kg kg⁻¹, com a dose de 2,9 t ha⁻¹ de gesso; a máxima ERA, de 0,20 kg kg⁻¹, com a dose de 3,9 t ha⁻¹ de gesso; e a máxima EUP, de 20 kg kg⁻¹, com a dose de 4,3 t ha⁻¹ de gesso.

Tabela 4.22 – Eficiências de aproveitamento de fósforo pelo trigo (2014) e pela soja (2014–15) após a aplicação de fósforo no sulco de semeadura, e 12 e 18 meses da aplicação de gesso agrícola, respectivamente.

Tratamento	EA	EF	EAF	ERA	FPP _P	EUP
-----kg kg ⁻¹ -----						
<i>Trigo (2014)</i>						
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)						
30	24,9 a	554,7 a	511,6 a	0,11 a	154,7 a	53,9 a
60	13,9 b	190,8 b	127,7 b	0,06 b	78,9 b	23,8 ab
90	9,0 b	233,1 b	89,4 b	0,03 b	52,3 c	12,6 b
DMS	6,6	290,6	321,0	0,04	5,7	26,9
Gesso (t ha ⁻¹)						
0	17,3	233,3	165,0	0,05	96,7	18,7
2	17,2	517,5	579,6	0,05	96,6	19,1
4	14,8	325,5	134,5	0,11	94,1	48,5
6	14,6	228,5	87,7	0,08	93,9	34,0
Efeito	ns	Q*	Q*	ns	ns	Q*
Valor de R ²	-	0,70	0,50	-	-	0,56
<i>Soja (2014–15)</i>						
Fósforo – P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)						
30	12,6 a	251,9 a	31,1 b	0,23 a	140,1 a	19,8 a
60	13,4 a	343,0 a	155,5 a	0,20 a	78,7 b	23,4 a
90	3,4 b	188,5 b	37,0 b	0,10 b	46,3 c	4,9 b
DMS	7,7	62,1	115,8	0,1	13,8	13,1
Gesso (t ha ⁻¹)						
0	7,2	150,3	36,1	0,14	84,9	12,4
2	9,7	231,3	122,4	0,15	87,9	14,0
4	9,9	382,6	104,1	0,24	88,4	21,0
6	12,3	280,4	35,4	0,17	90,0	16,7
Efeito	L*	Q*	Q*	Q*	ns	Q*
Valor de R ²	0,77	0,74	0,72	0,61	-	0,68

EA = eficiência agrônômica; EF = eficiência fisiológica; EAF = eficiência agrofisiológica; ERA = eficiência na recuperação aparente; FPP_P = Fator parcial de produtividade do fósforo; EUP = eficiência de uso do fósforo. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05). L = efeito linear por análise de regressão; Q = efeito quadrático por análise de regressão; ns = não significativo. *p<0,05.

4.6 DISCUSSÃO

4.6.1 Efeitos da aplicação do fósforo na semeadura do trigo (2014) e da soja (2014–15)

O acréscimo nas doses de P, independente do gesso, na semeadura do trigo e da soja aumentaram de forma quadrática os teores de Ca^{2+} na camada mais superficial do solo (Tabela 4.2 e 4.7). Aumentos de Ca^{2+} no solo podem ser obtidos com o fornecimento de SFT, uma vez que esta fonte contém aproximadamente 13% de CaO em sua composição. Também foram observados aumentos na disponibilidade de Mg^{2+} na camada 0–10 cm com o acréscimo de P no solo, provavelmente devido à redução do Ca^{2+} observada na maior dose de P (efeito quadrático), o que pode ter favorecido a liberação de íons Mg^{2+} do complexo de troca do solo. Isso também pode ter sido o motivo da redução da relação Ca:Mg nessa camada (Tabelas 4.2 e 4.7). O Ca e o Mg são cátions que competem pelos mesmos sítios de adsorção no solo, porém, eletrostaticamente, o Ca é retido mais fortemente que o Mg (SALVADOR et al., 2011). Conforme Ernani (2016), quando a concentração de um cátion é baixa, o elemento tende a ficar adsorvido preferencialmente nos sítios que têm maior energia, e isso aumenta linearmente o seu poder tampão no solo. Porém, quando o cátion estiver em altas concentrações, ocorre o contrário, ou seja, o poder tampão diminui, porque passa a ser adsorvido por sítios com menor energia de adsorção. Também é provável que, devido à solubilização do SFT $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2]$, tenha ocorrido a formação de fosfato de cálcio precipitado no solo nas maiores doses aplicadas do fertilizante (HAVLIN et al., 2014), reduzindo assim, os teores de Ca^{2+} . Embora os valores de pH do solo do presente estudo não seja o mais o mais adequado para tal reação, a adição de grandes quantidades de sais e fertilizantes ao solo pode ocasionar algumas reações secundárias, principalmente nas microrregiões adjacentes aos grânulos do fertilizante, causando alterações no equilíbrio das reações (ERNANI, 2016).

O incremento de doses de P na semeadura do trigo e da soja aumentou os teores de P no solo (Mehlich-1 e RTA), principalmente nas camadas mais superficiais do solo (até 20 cm) (Tabelas 4.2 e 4.7). Aumentos de P na superfície do solo com a aplicação de fertilizante fosfatado em SPD têm sido frequentemente relatados na literatura (CORRÊA et al., 2004; GONÇALVES JUNIOR et al., 2010; MACHADO et al., 2011, 2012). Esses resultados têm sido atribuídos ao aumento da saturação dos sítios de adsorção por meio da aplicação do fertilizante fosfatado, fazendo com que maior quantidade do nutriente se desloque para a solução. De acordo com Ernani (2016), o grau de saturação dos sítios de adsorção também é

responsável pelo maior efeito residual de P no SPD com relação aos sistemas com preparo do solo, pois nestes, os locais com alta concentração de P tendem a ser desintegrados com o revolvimento do solo.

Como o fosfato tem grande afinidade pelos sítios de adsorção, sua adição ao solo pode promover o deslocamento de parte dos ânions SO_4^{2-} para a solução do solo (ALVAREZ et al., 2007). Neste caso, estes resultados foram observados apenas para as doses de P na semeadura do trigo (Tabela 4.2). Os ânions competem entre si pelos sítios de adsorção específica, porém com diferentes afinidades, sendo os íons fosfato mais fortemente adsorvidos (ERNANI, 2016). De fato, observando-se as médias das camadas mais superficiais do solo (até 20 cm), nota-se que os teores de SO_4^{2-} no solo após o cultivo de trigo foram 48% superiores quando comparados aos teores médios de SO_4^{2-} no solo após o cultivo da soja (18 meses da aplicação de gesso). Essa redução nos teores de SO_4^{2-} de uma safra para outra, se deve à movimentação do sulfato pelo perfil do solo, e também, à extração e exportação do nutriente pelas culturas.

4.6.2 Efeito residual do gesso no solo após 12 e 18 meses da aplicação

Após 12 e 18 meses da aplicação de gesso, foi possível detectar diversas alterações nos atributos químicos do solo (Tabelas 4.3 e 4.8). Aos 12 e 18 meses da aplicação de gesso, independente do P, foram observados aumentos nos teores de Ca^{2+} e SO_4^{2-} , em todas as profundidades avaliadas, justamente pelo fato de o gesso ser uma excelente fonte desses nutrientes para o solo. Porém, houve redução nos teores de Mg^{2+} e K^+ das camadas superficiais, com consequente aumento na concentração desses cátions em subsuperfície. Além disso, houve significativa redução da m%, principalmente nas camadas abaixo de 10 cm de profundidade e, aos 12 meses, também foi detectada redução nos teores de Al^{3+} em função do efeito residual do gesso, em todas as camadas de solo.

Efeito residual do gesso nos atributos químicos do solo, similar ao ocorrido no presente estudo, também tem sido reportado após a sua aplicação aos 9, 18 e 30 meses (CAIRES et al., 2011), e também, aos 48 e 60 meses (COSTA & CRUSCIOL, 2016). A mobilidade de cátions após a aplicação de gesso tem sido explicada devido à formação de pares iônicos neutros (CaSO_4^0 , MgSO_4^0 e K_2SO_4^0) com o SO_4^{2-} , pela ação do Ca dissociado (CAIRES et al., 2003; 2011a,b; 2016; RAMPIM et al., 2011; 2015). A movimentação de cátions no perfil do solo pode também ter sido auxiliada pelo aumento de carbono orgânico dissolvido (COD) proveniente dos resíduos das culturas (FRANCHINI et al., 2001; 2003). Zambrosi et al. (2007) verificaram lixiviação de Mg^{2+} e reportaram que isso ocorreu devido à substituição do

Mg^{2+} pelo Ca^{2+} nas cargas negativas do solo, e que a presença do SO_4^{2-} favorece a lixiviação desse cátion, na forma de MgSO_4^0 . Desta forma, o aumento na relação Ca:Mg em função das doses de gesso, observado nesse estudo, ocorreu em consequência do aumento do Ca e da movimentação de MgSO_4^0 (CAIRES et al., 2011b).

Após 18 meses da aplicação de gesso observou-se um pequeno aumento no pH do solo na camada mais superficial (0–10 cm) (Tabela 4.8). O aumento no pH com a aplicação de gesso tem sido atribuído a uma reação de troca de ligantes na superfície das partículas de solo, envolvendo óxidos hidratados de Fe e Al, com o SO_4^{2-} deslocando OH^- e, assim, promovendo neutralização parcial da acidez (REEVE & SUMNER, 1972; CAIRES et al., 2003; COSTA & CRUSCIOL, 2016).

No presente estudo, o aumento de P disponível no solo devido ao efeito residual do gesso foi mais evidente com a utilização do extrator de Mehlich-1, o qual detectou aumentos significativos de P no solo em todas as camadas de solo, aos 12 e 18 meses (Tabelas 4.3 e 4.8). A RTA detectou aumento no P apenas na camada de 20–40 cm, após 18 meses da aplicação de gesso (Tabela 4.8). Desta forma, nota-se certa inconsistência dos extratores na detecção dos teores de P no solo. Talvez isso esteja ligado ao fato de o extrator de Mehlich-1 apresentar a desvantagem de solubilizar P ligado a Ca (RAIJ, 2011; SANTOS et al., 2008). A maioria dos trabalhos tem mostrado aumento do P em função do efeito residual do gesso apenas nas camadas mais superficiais do solo (máximo até 10 cm) (CAIRES et al., 2003; 2011a,b; ZANDONÁ et al., 2015). Porém, Rampim et al. (2013) observaram aumentos do P (Mehlich-1) em camadas até 40 cm, com a aplicação de $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso agrícola em solo com textura muito argilosa (800 g kg^{-1} de argila), após seis meses da aplicação de gesso. Dalla Nora & Amado (2013) também verificaram aumentos expressivos nos teores de P (Mehlich-1) em camadas de 15–25 e 25–40 cm, após 22 meses da aplicação de doses crescentes de gesso (até $6,5 \text{ t ha}^{-1}$) em um Latossolo Vermelho argiloso. Esses resultados sugerem que pode ter ocorrido movimentação de P ligado ao Ca pelo perfil do solo. Zambrosi et al. (2007), em um estudo sobre aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução do solo, verificaram que o incremento de doses de gesso favoreceu a formação de espécies de fosfato de cálcio até 40 cm de profundidade em um Latossolo Vermelho argiloso, com $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ de 4,6, na camada de 0–20 cm, e de 4,2, na camada de 20–40 cm. Todavia, mais estudos sobre especiação iônica da solução do solo após aplicação de gesso agrícola seriam necessários para aferir essa possibilidade.

4.6.3 Efeito da interação entre fósforo e gesso

O tratamento que recebeu a maior dose de P na semeadura (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) e a maior dose de gesso em área total (6 t ha⁻¹) proporcionou aumento no teor de Al³⁺ até 20 cm e na m% até 40 cm, e redução de Ca²⁺ até 60 cm de profundidade (Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6). Rampim et al. (2011) observaram elevação nos teores de Al³⁺ até 40 cm de profundidade com aplicação de doses de gesso acima de 2,5 t ha⁻¹. Rampim & Lana (2015) também verificaram aumentos na m% após 6 e 12 meses da aplicação de doses de gesso até 5 t ha⁻¹. Ernani et al. (2001) verificaram aumento nos teores de Al³⁺ em dois solos logo após a aplicação de 9,2 e 12 t ha⁻¹ de gesso em superfície. Os autores têm atribuído esses efeitos aos seguintes fatores: (i) à possível hidrólise do Al, deslocado das cargas negativas pelo Ca em excesso; (ii) ao aumento da concentração de eletrólitos em solo com predomínio de cargas negativas; e (iii) à possível acidificação do meio pela rizosfera (SARMENTO et al, 2001). Zandoná et al. (2015) mostraram um leve aumento de Al³⁺ no solo na profundidade de 10–20 cm após 9 meses da aplicação de gesso. Entretanto, os autores não relataram maiores problemas quanto à toxicidade do elemento, pois justificaram que a m% ficou abaixo de 10%. De acordo com Mello & Perez (2009), à medida que os metais alcalinos (bases trocáveis) são lixiviados do solo, há possibilidade de entrada de H⁺ e Al³⁺ no complexo de troca em substituição ao Ca²⁺ e outras bases.

Neste estudo, outra hipótese que se levanta é a possibilidade da precipitação de P e Ca, pela formação de fosfatos de cálcio no solo. Logo, os aumentos de Al³⁺ na solução e da m% seriam consequências da redução do Ca²⁺ disponível no solo. Salienta-se que o extrator de Mehlich-1 detectou maior resposta no aumento do P disponível com o acréscimo das doses de gesso, quando comparado à RTA, possivelmente porque o extrator ácido solubilizou parte do P ligado ao Ca. De acordo com Havlin et al. (2014), a dissolução inicial de fertilizantes fosfatados pode ocasionar acidificação do meio por causa da formação de H₃PO₄ em volta do grânulo, reduzindo o pH a 1,5. Todavia, quando a dissolução do H₃PO₄ ocorre, há aumento da concentração de cátions em volta do grânulo, neutralizando rapidamente a reação. Em poucos dias ocorre a formação de fosfatos de cálcio (fosfato bicálcico). Além disso, o aumento do Al³⁺ pode ter sido influenciado indiretamente pelo aumento na quantidade de H⁺ na solução – resultado da reação entre o fosfato e o Ca²⁺ [2H₂PO₄⁻ + 3Ca²⁺ ↔ Ca₃(PO₄)₂ + 4H⁺] (ERNANI, 2016).

Destaca-se que as interações que resultaram na redução do Ca²⁺ e nos aumentos dos teores de Al³⁺ e da m% não foram mais detectadas após 18 meses da aplicação da maior dose

de P associada com a maior dose de gesso. Isso certamente está relacionado ao maior tempo de efeito residual do gesso no solo associado à exportação de nutrientes pelos cultivos em sucessão, minimizando os efeitos da interação entre a adubação fosfatada e a aplicação de gesso. De acordo com Ernani (2016), com o passar do tempo após a adição de fertilizantes no solo, a concentração dos nutrientes diminui porque estes se difundem para o interior das estruturas dos componentes sólidos aos quais se ligam, lixiviam pelo perfil e, também, são absorvidos pelas culturas, diminuindo assim, o efeito residual tanto de cátions quanto de ânions no solo.

4.6.4 Alterações nos atributos radiculares do trigo (2014) e da soja (2014–15)

Melhorias nos atributos radiculares do trigo e da soja foram observadas quando as adições de P e de gesso foram realizadas de maneira isolada. De acordo com Lynch & Brown (2008), a disponibilidade de P no solo é a chave que regula o crescimento e desenvolvimento de raízes, incluindo comprimento e densidade, organização cortical, raízes adventícias e gravitropismo. Tal afirmação pôde ser comprovada neste estudo, pois observaram-se correlações positivas entre o P disponível no solo (Mehlich-1) e a densidade de comprimento e o comprimento total por área de raízes de trigo e soja.

As raízes de trigo mostraram-se mais responsivas aos tratamentos que as raízes de soja. As raízes de soja foram influenciadas apenas pela camada mais superficial do solo (0–10 cm), enquanto as raízes de trigo foram influenciadas por todas as camadas do perfil do solo. Destaca-se que o trigo apresentou comprimento total de raízes 46% maior que a soja. Como são mais eficientes na absorção de água e nutrientes (MANSCHADI et al., 2013; RICHARDSON et al., 2011), as gramíneas respondem mais rapidamente à fotossíntese e conseguem acumular maior quantidade de massa seca (parte aérea e raízes), o que as torna plantas com o sistema radicular capaz de explorar maiores porções do solo (LYNCH & BROWN, 2008; RICHARDSON et al., 2011). Todavia, a distribuição vertical das raízes ocorreu de maneira similar entre as culturas, sendo para o trigo e a soja, respectivamente, de 66% e 69% na camada de 0–10 cm, 23% e 22% na camada de 10–20 cm, 6% e 5% na camada de 20–40 cm, e 5% e 4% na camada de 40–60 cm. Li et al. (2017) observaram maior densidade de comprimento de raízes de soja com o aumento da adubação fosfatada (até 35 kg P_2O_5 ha⁻¹) em SPD. Avaliando a distribuição vertical, esses autores observaram maior concentração das raízes em camadas superficiais de 0–10 cm em SPD (44%), comparado ao sistema convencional de preparo do solo (24%). Kang et al. (2014), avaliando a aplicação de

P na superfície e em diferentes camadas do solo, observaram respostas positivas das raízes de trigo ao incremento de P em todos os tratamentos. Os autores notaram que a massa seca e o comprimento total de raízes foram maiores nos tratamentos em que o P foi aplicado em camadas mais profundas (20–30 cm), sugerindo que a planta emite sinais na presença do P para estimular o crescimento radicular a absorver o nutriente. Por esse motivo, as raízes se acumulam nas camadas superficiais em SPD (PAVINATO et al., 2009; LI et al., 2017).

Caires et al. (2002) e Caires et al. (2001) observaram pouca influência do gesso no crescimento radicular de trigo e soja, respectivamente. Costa & Crusciol (2016) também não observaram respostas do sistema radicular da soja ao gesso agrícola. Os autores justificaram a falta de resposta devido ao baixo nível crítico de Ca exigido pelas raízes e também pelo menor efeito tóxico do Al em SPD, devido à complexação do elemento com orgânicos solúveis presentes nos resíduos culturais. No presente estudo, os teores iniciais de Al^{3+} no solo, nas camadas de 20–40 e 40–60 cm, eram considerados tóxicos para as plantas (9 a 10 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$). Desta forma, o aumento na concentração de Ca^{2+} por meio da aplicação de gesso foi essencial para o alongamento radicular do trigo e da soja, cujo efeito pôde ser comprovado pelas correlações positivas entre os teores de Ca^{2+} e o comprimento radicular das culturas (Tabela 4.14). Cabe ressaltar que existem diferenças entre espécies e variedades de plantas, ocorrendo controle genético da eficiência das plantas na tolerância ao Al e à utilização de Ca (COSTA & CRUSCIOL, 2016). De acordo com Rosolem & Marcelo (1998), a soja parece ser uma planta que necessita de poucas quantidades de Ca para o seu desenvolvimento, uma vez que esses autores não observaram maiores restrições no crescimento radicular em solos com teores de Ca de 8,5 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. Destaca-se que apenas a densidade de comprimento de raízes da soja foi correlacionada positivamente com os teores de SO_4^{2-} , na camada de 10–20 cm. Isso significa que, além do Ca^{2+} , esse nutriente também representou papel importante ao desenvolvimento radicular da soja, uma vez que leguminosas têm maior necessidade de absorção de SO_4^{2-} para a formação de proteínas nos grãos (HAWKESFORD et al., 2012).

A maior dose de P (90 kg $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ha}^{-1}$) associada com a maior dose de gesso (6 t ha^{-1}) afetou negativamente o desenvolvimento radicular, principalmente da cultura do trigo, em todas as profundidades amostradas. Possivelmente esses resultados estão ligados à redução do Ca^{2+} , e o consequente aumento nos teores de Al^{3+} e da m% em função da aplicação das referidas doses em conjunto no solo. A toxicidade por Al é um dos fatores que mais influencia o crescimento radicular em solos ácidos. Entretanto, não é o único fator de importância, porque a toxicidade do Al^{3+} é modulada pela especiação do elemento e pela presença de Ca. O

Ca desempenha importante função na proteção das raízes, principalmente em pH baixo (NEUMANN & RÖMHELD, 2012).

Os menores valores de atributos radiculares com a aplicação conjunta das maiores doses de P e de gesso também foram observados para as raízes de soja, mas apenas na camada mais superficial (0–10 cm). Fageria & Moreira (2011) e Fageria (2013) mostraram diversas pesquisas envolvendo fertilização fosfatada e desenvolvimento radicular de raízes de milho, trigo, feijão e arroz, e concluíram que as raízes apresentam maiores respostas à adubação fosfatada quando cultivadas em solos com baixos teores de P, e também que doses muito elevadas do nutriente podem ser prejudiciais para a cultura, principalmente em ambientes com alto teor de P disponível.

4.6.5 Alterações nos atributos das plantas de trigo (2014) e de soja (2014–15)

As concentrações dos nutrientes nas folhas foram consideradas adequadas para as culturas do trigo e da soja (MALAVOLTA et al., 1997; PAULETTI, 2004). De maneira geral, a adubação fosfatada alterou as concentrações de P nas folhas de trigo, Mg nas folhas de soja, e Mn e Zn em ambas as culturas (Tabela 4.15). O incremento de Mg, observado nas folhas de trigo com o aumento das doses de P provavelmente ocorreu devido ao aumento deste elemento no solo em função da adubação fosfatada (Tabela 4.2). A adubação fosfatada reduziu a concentração de Zn e aumentou a de Mn tanto em folhas de trigo, quanto de soja. A forma como a redução na concentração de Zn ocorre pode variar, podendo ser pelo efeito de diluição decorrente do crescimento da planta, diminuição da absorção, restrição do transporte para a parte aérea ou imobilização do Zn nas raízes pela formação de fitatos de Zn (HAWKESFORD et al., 2012). Zhang et al. (2015) observaram que doses de P_2O_5 até 50 kg ha⁻¹ promoveram aumento na concentração foliar e translocação de Zn em plantas de trigo, mas acima dessa dose, verificaram expressivo decréscimo do nutriente nas plantas. O aumento na concentração foliar de Mn pode ter ocorrido porque, num primeiro momento, a dissolução de adubos fosfatados geram íons H^+ no solo, o que pode aumentar a disponibilidade de Mn pelo aumento da acidez (RAIJ, 2011).

Apenas a soja apresentou maior concentração de P nas folhas com o aumento da adubação fosfatada e da aplicação de gesso. A soja apresenta maior demanda de P que o trigo. Como a soja realiza fixação biológica de N_2 , ela necessita de alto consumo de energia (redução do N_2 atmosférico), dependendo da disponibilidade de ATP (COOPER & SCHERER, 2012). O aumento no teor foliar de P em função das doses de gesso se deve ao

aumento de P nas camadas superficiais do solo. Salienta-se que o gesso utilizado neste estudo continha alto teor de P em sua constituição (17 kg t^{-1} de P_2O_5). Caires et al. (2003; 2011b) também observaram aumento de P nas folhas de soja em função do efeito residual do gesso.

O gesso aumentou Ca e S nas folhas de trigo e soja, e reduziu Mg nas folhas de soja. Esses resultados estão associados com o que ocorreu na disponibilidade de Ca^{2+} , SO_4^{2-} e Mg^{2+} no solo em função das doses de gesso (Tabelas 4.3 e 4.8). O gesso é uma excelente fonte de Ca e S, e a redução na concentração foliar de Mg da soja pode ser devida à movimentação de Mg^{2+} das camadas superficiais para o subsolo, com consequente aumento da relação Ca:Mg, fato que resulta em aumento na competição pelos sítios de absorção. Resultados semelhantes foram observados em estudos com as culturas de milho (CAIRES et al., 2011), soja (CAIRES et al., 2003; RAMPIM et al., 2011; COSTA & CRUSCIOL, 2016) e trigo (CAIRES et al., 2002; RAMPIM et al., 2011). A soja apresenta requerimentos mais altos de Mg quando comparada ao trigo, pois o Mg participa como catalisador da reação de formação do ATP (HAWKESFORD et al., 2012), energia requerida em grande quantidade por plantas fixadoras de N_2 (COOPER & SCHERER, 2012).

O gesso aumentou os teores foliares de Fe e Mn nas culturas de trigo e soja, e também o teor foliar de Cu na cultura do trigo. Rampim et al. (2015) não observaram efeito de doses de gesso (até $2,4 \text{ t ha}^{-1}$) na concentração de micronutrientes em folhas de soja. Todavia, Costa & Crusciol (2016) obtiveram resultados contrários aos deste estudo, relatando redução nas concentrações de Fe, Mn e Zn em folhas de soja, com a aplicação de gesso. Rasouli et al. (2013), por sua vez, verificaram maiores concentrações de Fe e Zn em folhas de trigo com a aplicação de gesso. Carvalho et al. (2012), avaliando a concentração de micronutrientes em amostras de gesso agrícola, encontraram valores baixos de Zn (26 mg kg^{-1}) e Cu (19 mg kg^{-1}), médios de Mn (76 mg kg^{-1}) e altos de Fe (até 2.347 mg kg^{-1}), concluindo que o gesso agrícola representa uma fonte considerável de micronutrientes que não pode ser desprezada.

Embora a produção de MS de trigo e soja não tenha sido afetada pelos tratamentos, foi verificado aumento nas extrações de N e P pelas culturas do trigo e soja. A interação sinérgica entre $\text{N} \times \text{P}$ é bastante conhecida na literatura. A absorção de NO_3^- e a redução do N_2 para a fixação biológica de N são processos que requerem energia metabólica da planta, necessitando, portanto, de substâncias redutoras e de ATP, produzido através do P (BREDEMEIER & MUNDSTOCK, 2000). A maior extração de P pelas culturas certamente foi influenciada pelos maiores teores de P no solo obtidos com a adubação fosfatada.

Apenas a soja extraiu maiores quantidades de S em função das doses de P, mesmo que esse nutriente não tenha sido aumentado no solo pela adubação fosfatada (Tabela 4.16). Isso

provavelmente ocorreu pelo fato de a soja necessitar de maiores quantidades do nutriente devido ao maior teor de proteína nos grãos, em relação às gramíneas (SFREDO & LANTMANN, 2007). O S é constituinte dos aminoácidos cisteína e metionina (principalmente) e, portanto, das proteínas que o contêm (HAWKESFORD et al., 2012). Por outro lado, o gesso promoveu maiores extrações de S e Ca, em ambas as culturas. Isso também está ligado ao fato de o gesso fornecer grandes quantidades desses nutrientes ao solo. O acréscimo na absorção de Ca e S verificados por Caires et al. (2002) proporcionou incremento na produtividade da cultura do trigo, 20 meses após a aplicação de 3 a 9 t ha⁻¹ de gesso. Porém, acréscimos de Ca e S em plantas de soja normalmente não têm influenciado a produtividade da cultura (CAIRES et al., 2003; 2011; RAMPIM et al., 2011).

Também houve aumento nas extrações de micronutrientes com o incremento de doses de P e de gesso, com exceção da extração de Zn pela soja, a qual foi diminuída com as doses de P (Tabela 4.16). Embora a relação de antagonismo entre P × Zn seja a mais conhecida na literatura, há relatos de que o P pode aumentar a absorção de Zn e até mesmo não interferir (ARAÚDO & MACHADO, 2006; ZHANG et al., 2015). Salienta-se que, tanto o fertilizante fosfatado (SFT) quanto o gesso agrícola podem fornecer micronutrientes ao solo na forma de impurezas em suas constituições (CARVALHO et al., 2012).

As doses de P na semeadura interferiram nas exportações de N, P, Mg, S, Fe e Zn pelos grãos de trigo, e de todos os nutrientes pelos grãos de soja. A aplicação de gesso, por sua vez, aumentou as exportações de P e S pelo trigo e de N, Ca, S, Fe e Zn pela soja (Tabela 4.17). Destaca-se que o aumento das exportações de nutrientes esteve relacionado com o rendimento de grãos (Tabela 4.20), significando que há maior translocação de nutrientes com o aumento da produtividade das culturas. Além disso, o maior crescimento radicular proporcionado pela aplicação de P e de gesso agrícola (de maneira independente), e a adequada disponibilidade hídrica durante o ciclo de desenvolvimento das culturas (Figura 4.1), favoreceram a absorção de nutrientes por difusão e fluxo de massa (CRUSCIOL et al., 2003; 2007), o que provavelmente refletiu na maior translocação para os grãos.

4.6.6 Produtividade e eficiência do uso de fósforo pelas culturas do trigo (2014) e da soja (2014–15)

Interação entre as doses de P e de gesso foi observada para o rendimento de grãos de trigo (Figura 4.4). A produtividade de trigo aumentou de modo linear em função das doses de P, na ausência de gesso, e também em função das doses de gesso, na ausência de P. Aumento

no rendimento de grãos de trigo com o incremento de doses de P foi bem reportado por Vieira et al. (2015), os quais verificaram respostas positivas do trigo ao aumento das doses de P na adubação, em 12 experimentos com teores de P no solo (camada 0–20 cm) variando entre 1,2 e 13,2 mg dm⁻³. Os rendimentos de grãos de trigo encontrados pelos autores variaram entre 2.450 a 5.689 kg ha⁻¹. O trigo, em especial, necessita de adequado suprimento de P nos primeiros estádios de desenvolvimento e, mesmo em solo bem suprido com esse nutriente, a aplicação de P na semeadura, em geral, traz benefícios à planta, inclusive com relação à sua tolerância ao frio (WIETHÖLTER, 2011). Em estudo recente, verificou-se que o trigo apresenta nível crítico mais elevado de P na camada de 0–20 cm (8,2 mg dm⁻³), quando comparado com o da soja e do milho (6,2 mg dm⁻³) (VIEIRA, et al., 2015).

Caires et al. (2002) observaram incremento na produtividade de trigo com o aumento de doses de gesso, encontrando máximo rendimento de grãos (3.825 kg ha⁻¹) com a aplicação de 8,2 t ha⁻¹ de gesso. Pauletti et al. (2014), em um estudo de longo prazo, também observaram respostas positivas do trigo à aplicação de gesso. Os autores obtiveram produtividades de até 3.400 kg ha⁻¹ com a aplicação de 12 t ha⁻¹ de gesso. Rampim et al. (2011), por sua vez, verificaram resposta linear do trigo ao aumento de doses de gesso até 5 t ha⁻¹, porém, apresentando baixas produtividades (cerca de 1.800 kg ha⁻¹ na máxima dose de gesso). De acordo com os autores, a baixa produtividade de trigo foi decorrente de estiagem no início do desenvolvimento e no florescimento do trigo, e ao excesso de chuvas na colheita.

Vale ressaltar que, no presente estudo, o rendimento médio de grãos de trigo foi elevado (4.600 kg ha⁻¹), estando acima da média de produtividade do Estado do Paraná na safra de 2014, a qual foi de 2.731 kg ha⁻¹ (CONAB, 2015). O alto rendimento de grãos de trigo nesse estudo pode ser atribuído à: (i) distribuição regular de chuvas no período de emborrachamento e florescimento da cultura (ago/set 2014); (ii) à estiagem no período de maturação (out/2014) (Figura 4.1), o que acabou favorecendo a colheita, evitando, assim, a germinação dos grãos na espiga; e (iii) aos altos teores de MO do solo na camada 0–20 cm (44 g dm⁻³) (Tabela 4.1). Além disso, observou-se que, na ausência do P, o gesso proporcionou redução nos teores de Al³⁺ e da m%, e aumento nos teores de Ca²⁺ trocável, em superfície e subsuperfície (Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6), e também, promoveu melhorias no crescimento radicular (Figura 4.2), o que possivelmente influenciou para a obtenção dos altos tetos de produtividade. Entretanto, o incremento de doses de gesso no tratamento que recebeu a maior dose de P (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) prejudicou o rendimento de grãos de trigo. Isso deve ter ocorrido por causa da redução no crescimento radicular de trigo observado com o uso da maior dose de P associada com a maior dose de gesso (Figura 4.2a). Salienta-se que foram obtidas correlações significativas

entre o rendimento de grãos de trigo e a densidade de comprimento e o comprimento radicular por área (até 60 cm) (Tabela 4.21), ficando evidente os reflexos negativos da inibição do sistema radicular na produtividade de grãos de trigo. Kang et al. (2014), estudando o efeito da aplicação de P e a eficiência do uso da água pelo trigo, observaram fortes correlações positivas ($r = 0,94$) entre o rendimento de grãos de trigo e a massa seca e comprimento de raízes.

Nesse estudo, a máxima dose de gesso (6 t ha^{-1}) estaria fornecendo ao solo cerca de 102 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Desta forma, o residual de P deixado no solo pela aplicação de gesso, mais a dose de $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ na semeadura, pode ter prejudicado a cultura devido ao desequilíbrio na rizosfera. Destaca-se, ainda, que teores elevados de P podem prejudicar a associação das raízes com micorrizas (GRANT et al., 2005). De acordo com esses autores, hifas extraradiculares são mais eficientes do que raízes na captura de nutrientes, por serem estruturas extremamente longas e finas, mas o aumento de P na planta com a adição de fertilizante fosfatado no solo, reduz a eficiência de colonização de fungos simbióticos, podendo interferir no rendimento de grãos.

Batistella Filho et al. (2013) encontraram respostas positivas da soja, em duas safras, com o aumento de doses de P até $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. Porém, respostas lineares da soja a altas doses de P têm sido normalmente relatadas em locais com teores baixos ou médios de P no solo (ARAÚJO et al.; 2005; GONÇALVES JÚNIOR et al., 2010; VALADÃO JÚNIOR et al., 2008). De acordo com Vieira et al. (2015), quando os teores de P no solo estão acima do nível crítico, a probabilidade de resposta da soja à adubação fosfatada é pequena, podendo até ser negativa quando os níveis de P no solo estiverem na faixa muito alta. Para Latossolos do Paraná, esses autores determinaram níveis críticos de P para a soja (camada 0–20 cm) de $6,2 \text{ mg dm}^{-3}$. No presente estudo, o teor inicial de P no solo, na camada 0–20 cm, foi considerado alto ($10,7 \text{ mg dm}^{-3}$), fato que justifica a resposta quadrática da soja às doses de P aplicadas, obtendo-se máxima produtividade (4.497 kg ha^{-1}) com a dose de $50 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$.

Embora o gesso tenha causado diversas alterações nos atributos de solo e planta, não foi observada resposta do rendimento de grãos de soja após 18 meses da aplicação de gesso (Figura 4.4). Ausência de resposta da soja ao gesso tem sido frequentemente relatada na literatura (CAIRES et al.; 2003, 2011a,b; DALLA NORA & AMADO, 2013; RAMPIM et al., 2011; MOTTA et al., 2013). Conforme Caires et al. (2011a), a ausência de resposta de soja ao gesso pode estar relacionada à alta capacidade de absorção de Ca^{2+} pela cultura, bem maior em relação às gramíneas. Para cereais como milho, trigo e arroz, a CTC radicular varia de 100 a $200 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, enquanto que para leguminosas, como soja e feijão, a CTC radicular varia

de 400 a 800 mmol_c kg⁻¹ (FERNANDES & SOUZA, 2006). Como a cultura da soja apresenta elevada CTC radicular, naturalmente tende a acumular mais cátions polivalentes (Ca²⁺ e Mg²⁺) em torno da rizosfera, reduzindo desta forma, possíveis respostas à adição de fonte que contenha Ca em sua composição (CAIRES et al., 2011b; RAMPIM et al., 2011). A CTC radicular é originada, principalmente, da dissociação dos grupos carboxílicos das moléculas de pectina, bem como da celulose e hemicelulose da parede celular (NEUMANN & RÖMHELD, 2012).

A intensidade da precipitação pluvial e a adequada distribuição das chuvas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja também pode ter contribuído para a ausência de resposta da cultura à aplicação de gesso. De modo geral, as respostas da soja ao gesso têm sido mais evidentes em situações de deficiência hídrica (CAIRES et al., 2001; PAULETTI et al., 2014; ZANDONÁ et al., 2015). O Al³⁺ é o cátion que mais aumenta na solução com a diminuição do conteúdo de água no solo, relativamente aos cátions monovalentes e bivalentes (ERNANI, 2016). Por isso, os efeitos da aplicação de gesso tendem a ser mais pronunciados em situações de déficit hídrico.

O rendimento médio de grãos de soja também foi elevado nesse estudo (4.310 kg ha⁻¹), estando acima da média de produtividade paranaense (3.294 kg ha⁻¹) para a safra 2014–15 (CONAB, 2015). Dalla Nora & Amado (2013) também encontraram alta produtividade de soja (4.500 kg ha⁻¹) do mesmo cultivar utilizado nesse estudo (Nidera 5909), após a aplicação de gesso em um Latossolo Vermelho argiloso.

A eficiência média de utilização de fertilizantes fosfatados é geralmente inferior a 45% (SYERS et al., 2008; MANSCHADI et al., 2014), podendo também apresentar valores mais baixos (entre 10 a 30%) (MALHI et al., 2002). O P passa rapidamente por uma série de reações que diminuem gradualmente a sua solubilidade e disponibilidade para as plantas, devido à favorável adsorção dos íons fosfatos nas superfícies dos óxidos de Fe e Al (BROGGI et al., 2010). Neste trabalho, as maiores eficiências de uso do P, em média, foram observadas para a cultura do trigo (30%) em comparação à cultura da soja (16%). A EUP decresceu com o aumento das doses de P na semeadura do trigo e da soja, seguindo, portanto, a lei dos incrementos decrescentes (RAIJ, 2011). Com o aumento na concentração do nutriente no solo, o incremento no influxo passa a ser cada vez menor, até atingir um valor máximo, acima do qual o aumento na concentração não incrementa a velocidade de absorção e a EUP pela cultura (ERNANI, 2016). Por outro lado, as doses de gesso aumentaram a EUP pelo trigo até a dose de 5 t ha⁻¹, após 12 meses da aplicação, e a EUP pela soja até a dose de 4,3 t ha⁻¹, após 18 meses da aplicação.

Em nosso estudo observou-se que a aplicação de gesso na superfície do solo pode proporcionar economia com a adubação fosfatada e manter elevado teto de rendimento de grãos. Isso foi constatado na cultura do trigo em que houve interação significativa entre as doses de P e de gesso no rendimento de grãos. Nesse caso, a máxima produtividade de trigo seria obtida com 90 kg P_2O_5 ha⁻¹ na semeadura sem aplicação de gesso (4.987 kg ha⁻¹), com 60 kg P_2O_5 ha⁻¹ na semeadura e 2,0 t ha⁻¹ de gesso (4.942 kg ha⁻¹) e sem aplicação de P na semeadura com 4,0 t ha⁻¹ (4.653 kg ha⁻¹) ou 6,0 t ha⁻¹ (4.621 kg ha⁻¹) de gesso. Nota-se que a dose de P na semeadura poderia ser diminuída com o aumento na dose de gesso até 4,0 t ha⁻¹, sem comprometer o rendimento de grãos de trigo. No caso da soja, o rendimento de grãos ocorreu de forma independente da interação, tendo-se obtido maior produtividade de soja com a aplicação de 50 kg P_2O_5 ha⁻¹ na semeadura.

4.7 CONCLUSÕES

1. O efeito residual do gesso agrícola no solo aumenta a EUP pelas culturas de trigo e soja. Ajustando-se adequadamente as doses de gesso agrícola e as de fósforo na semeadura, é possível obter altas produtividades de grãos e proporcionar economia de fertilizante fosfatado.

2. A disponibilidade de fósforo no solo influencia o crescimento radicular que, por sua vez, interfere no rendimento de grãos das culturas de trigo e soja. Por isso, o aumento na EUP pelas culturas está relacionado a ambos os fatores.

3. O efeito residual de dose excessiva de gesso agrícola sobre a superfície em conjunto com dose elevada de fósforo na semeadura, em solo com alto teor de fósforo, prejudica o crescimento radicular e o rendimento de grãos, principalmente da cultura do trigo.

4.8 REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, H. K.; PEREIRA, F. P. Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p.596-635.
- ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p.253-280.
- ARAÚJO, W. F.; SAMPAIO, R. A.; MEDEIROS, R. D. Resposta de cultivares de soja à adubação fosfatada. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, p.129-134, 2005.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. **Mercado de fertilizantes: Janeiro a julho de 2016**. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/estatistica/comentarios.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2016.
- BATISTELLA FILHO, F.; FERREIRA, M. E.; VIEIRA, R. D.; CRUZ, M. C. P.; CENTURION, M. A. P. C.; SYLEVESTRE, T. B.; RUIZ, J. G. C. L. Adubação com fósforo e potássio para produção e qualidade de sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, p.783-790, 2013.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, v.30, p.365-372, 2000.
- BROGGI, F.; OLIVEIRA, A. L. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G.; NASCIMENTO, C. W. A. Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation time. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.32-38, 2010.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas no solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.275-286, 2003.
- CAIRES, E. F.; CORRÊA, J. C. L.; CHURKA, S.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. **Scientia Agrícola**, v.63, p.502-509, 2006.
- CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agrícola**, v.59, p.357-364, 2002.
- CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; FELDHAUS, I. C. BLUM, J. crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.1029-1040, 2001.
- CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v.27, p.45-53, 2011a.

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

CAIRES, E. F.; ZARDO FILHO, R.; BARTH, G.; JORIS, H. A. W. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO₃-N in Subsoil. **Pedosphere**, v.26, p.474-485, 2016.

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

CARVALHO, V. G. B.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M. Potencial de Fertilizantes e corretivos no aporte de micronutrientes ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.931-938, 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Setembro 2015**. Brasília: CONAB, v.2, 2015. 134p. Disponível em:
<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_09_11_10_42_03_boletim_graos_setembro_2015.pdf>. Acesso em: 29 set. 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Agosto 2016**. Brasília: CONAB, v.3, 2016. 176p. Disponível em:
<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_08_09_12_08_19_boletim_graos_agosto_2016.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2016.

COOPER, J.; SCHERER, H. Nitrogen Fixation, In: MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. San Diego: Elsevier, 2012. p.389-408.

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.1231-1237, 2004.

COSTA, H. M. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v.74, P.119-132, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; ARF, O.; SORATTO, R. P.; MACHADO, J. R. Extração de macronutrientes pelo arroz de terras altas sob diferentes níveis de irrigação por aspersão e de adubação. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.9, p.145-150, 2003.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; ARF, O. Produtividade de grãos e exportação de nutrientes de cultivares de arroz irrigadas por aspersão em consequência da época de semeadura. **Bragantia**, v.66, n. 2, p. 247-257, 2007.

DALLA NORA, D. D.; AMADO, T. J. C. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. **Agronomy Journal**, v.105, p.1393-1403, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Safira**. São Carlos: EMBRAPA INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2010. Disponível em: <<http://labimagem.cnpdia.embrapa.br/Ferramentas.aspx?ferramenta=4>>. Acesso em: abr. 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353p.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. 2.ed. Lages: O Autor, 2016. 256p.

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

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, p.6-16, 1998.

FAGERIA, N. K. **The role of plant roots in crop production**. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2013. 451p.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plantas. **Advances in Agronomy**, v.110, p.251-331, 2011.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO E IRRIGAÇÃO – FEBRAPDP. **Plantio direto: A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira**. Foz do Iguaçu: Parque Itaipu, 2015. 144p. Disponível em: <http://febrapdp.org.br/download/publicacoes/LIVRO_PLANTIO_DIRETO_WEB.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2016.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, p.109-112, 2014.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Absorção de nutrients. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p.115-152.

FRANCHINI, J. C.; GONZALEZ-VILLA, F. J.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Rapid transformations of plant water soluble organic compounds in relation to cation mobilization in acid Oxisol. **Plant and Soil**, v.231, p.55-63, 2001.

FRANCHINI, J. C.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Organic composition of green manures during growth and its effect on cation mobilization in an acid Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, p.2045-2058, 2003.

FUNDAÇÃO ABC. **Monitoramento: Estações Agrometeorológicas**. Disponível em: <<http://sma.fundacaoabc.org/monitoramento/grafico/mensal>>. Acesso em 20 ago. 2016.

GONÇALVES JUNIOR, A. C.; NACKE, H.; MARENGONI, N. G.; CARVALHO, E. A.; COELHO, G. F. Produtividade e componentes de produção da soja adubada com diferentes doses de fósforo, potássio e zinco. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, p.660-666, 2010.

GRANT, C.; BITTMAN, S.; MONTREAL, M.; PLENCHETT, C.; MOREL, C. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. **Canadian Journal of Plant Science**, p.3-14, 2005.

HAVLIN, J. H.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management**. 8.ed. New Jersey: Prentice Hall, 2014. 505p.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; MOLLER, I. S.; WHITE, P. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. San Diego: Elsevier, 2012. p.135-190.

IBM®. **Software SPSS Statistics Base versão 22.0**. 2013. Disponível em: <<http://www-03.ibm.com/software/products/pt/spss-stats-base>>. Acesso em: 05 ago. 2016.

JORGE, L. A. C.; SILVA, D. J. C. B. **Safira: manual de utilização**. São Carlos: EMBRAPA INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2010. 29p.

KANG, L.; YUE, S.; LI, S. Effects of phosphorus application in different soil layers on root growth, yield, and water-use efficiency of winter wheat grown under semi-arid conditions. **Journal of Integrative Agriculture**, v.12, p.2028-2039, 2014.

LI, H.; MOLLIERC, A.; ZIADIA, N.; SHIA, Y.; PARENTB, L. E.; MOREL, C. Soybean root traits after 24 years of different soil tillage and mineral phosphorus fertilization management. **Soil & Tillage Research**, v.165, p.258-267. 2017.

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Root strategies for phosphorus acquisition. In: WHITE, P. J.; HAMMOND, J. P. (Eds.). **The ecophysiology of plant-phosphorus interactions**. Heidelberg: Springer, 2008. p.83-116.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. **Bioscience Journal**, v.28, p.1-7, 2012.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Bioscience Journal**, v.27, p.70-76, 2011.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Potafós, 1997. 319p.

MALHI, S. S.; HADERLEIN, D. G.; PAULY, D. G.; JOHNSTON, A. M. Improving fertilizer phosphorus use efficiency. **Better Crops**, v.86, p.1-9, 2002.

MANSCHADI, A. M.; KAUL, H. P.; VOLLMANN, J.; EITZINGER, J.; WENZEL, W. Developing phosphorus-efficient crop varieties: An interdisciplinary research framework. **Field Crops Research**, Article in Press, 2014.

MANSCHADI, A. M.; MANSKE, G. G. B.; VLEK, P. L. G. Root architecture and resource acquisition: Wheat as a model plant. In: ESCHER, A.; BEECKMAN, T. (Eds.). **Plant roots the hidden half**. 4.ed. USA: CRC Press. 2013. p.22.1-22.18.

MELLO, J. W. V.; PEREZ, D. V. Equilíbrio químico das reações no solo. In: MELO, V. F.; ALLELONI, L. R. (Eds.). **Química e mineralogia do solo (parte I)**. Viçosa: SBCS, 2009. p.151-250.

MOLIN, P. V. D.; RAMPIM, L.; FÁVERO, F.; LANA, M. C.; SARTO, M. V. M.; ROSSET, J. S.; MATTEI, D.; DIEL, P. S.; MOLIN, R. N. D. Response to simple superphosphate and top-phos fertilizer on wheat in an oxisoil. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v.18, p.121-132, 2015.

MOTTA, L. R.; BORGES, B. M. M. N.; FLORES, R. A.; SANTOS, C. L. R.; PRADO, R. M.; SOUSA, J. I. Gessagem na cultura da soja no sistema de plantio direto com e sem adubação potássica. **Revista Agroambiente**, v.7, p.129-135, 2013.

NEUMANN, G.; RÖMHELD, V. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. San Diego: Elsevier, 2012. p.347-368.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

OLIVEIRA, C. M. B.; GATIBONI, L. C.; MIQUELLUTI, D. J.; SMYTH, T. J.; ALMEIDA, J. A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia de ligação em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo de Langmuir. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1805-1815, 2014.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. 38p.

PAULETTI, V. **Nutrientes: teores e interpretação**. 2.ed. Castro: Fundação ABC, 2004. 86p.

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

PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.495-505, 2014.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, v.105, p.149-155, 2009.

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

RAIJ, B.; QUAGGIO, J. A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. In: RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.;

QUAGGIO, J.A. (Eds.). **Análises químicas para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, p.189-199, 2001.

RAMPIM, L.; BORSOI, A.; MOLIN, P. V. D.; SARTO, M. V. M.; ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; LIMA, P. R.; GUIMARÃES, V. F.; OHLAND, T.; KLEIN, J. Foliar tissue, grain yield and economic return by surface application of gypsum and diferente number of soybean plants in precision seed drill. **African Journal of Agricultural Research**, v.10, p.1636-1646, 2015.

RAMPIM, L.; LANA, M. C. Ion mobility and base saturation after gypsum application in continuous soybean-wheat cropping system under no-till. **Australian Journal of Crop Science**, v.9, p.468-476, 2015.

RAMPIM, L.; LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em Latossolo Vermelho submetido ao gesso cultivado com trigo e soja. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, p.1623-1638, 2013.

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

RASOULI, F.; POUYA, A. K.; KARIMIAN, N. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum. **Geoderma**, v.193-194, p.246-255, 2013.

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

RICHARDSON, A. E.; LYNCH, J. P.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; SMITH, F. A.; SMITH, S. E.; HARVEY, P. R.; RYAN, M. H.; VENEKLAAS, E. J.; LAMBERS, H.; OBERSON, A.; CULVENOR, R. A.; SIMPSON, R. J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant and Soil**, v.349, p.121-156, 2011.

ROSOLEM, C. A.; MARCELLO, C. S. Crescimento radicular e nutrição mineral da soja em função da calagem e adubação fosfatada. **Scientia Agricola**, v.55, p.448-455, 1998.

SALVADOR, J. T.; CARVALHO, T. C.; LUCCHESI, L. A. C. Relações cálcio e magnésio presentes no solo e teores foliares de macronutrients. **Revista de Ciências Agrárias e Ambientais**, v.9, p.37-32, 2011.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, p.576-586, 2008.

SARMENTO, P.; CORSI, M.; CAMPOS, F. P. Resposta da alfafa a fontes de fósforo associadas ao gesso e à calagem. **Scientia Agricola**, v.58, p.381-390, 2001.

SCHOLZ, R. W.; ULRICH, A. E.; EILITTA, M.; ROY, A. Sustainable use of phosphorus: A finite resource. **Science of The Total Environment**, v.461, p.799-803, 2013.

SFREDO, G. J.; LANTMANN, A. F. **Enxofre: nutriente necessário para maiores rendimentos da soja**. Londrina: EMBRAPA Soja, 2007. 6p.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information**. Roma: FAO, 2008. 108p.

VALADÃO JÚNIOR, D. D.; BERGAMIN, A. C.; VENTUROSIO, L. R.; CARON, B. O.; SCHMIDT, D. Adubação fosfatada na cultura da soja em Rondônia. **Scientia Agricola**, v.9, p.369-375, 2008.

VIEIRA, R. C. B.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; MORAES, P.; CARNIEL, E. Adubação fosfatada para alta produtividade de soja, milho e cereais de inverno cultivados em rotação em Latossolos em plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p.794-808, 2015.

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

WIETHÖLTER, S. Fertilidade do solo e a cultura do trigo no Brasil. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, C. R. **Trigo no Brasil**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2011. p.135-184.

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

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.45, p.128-137, 2015.

ZHANG, W.; LIU, D.; LI, C.; CUI, A.; CHEN, X.; RUSSELL, Y. Zinc accumulation and remobilization in winter wheat as affected by phosphorus application. **Field Crops Research**, Article in press, 2015.

5 – INFLUÊNCIA DO GESSO NA EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM PLANTAS DE TRIGO E SOJA

5.1 RESUMO

Esse trabalho objetivou avaliar a influência da aplicação de gesso na eficiência da adubação fosfatada do trigo e da soja, em casa de vegetação. Nesse estudo, além do gesso agrícola, utilizou-se o sulfato de cálcio puro ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) com intuito de eliminar a influência das impurezas provenientes do gesso agrícola. Foram realizados dois experimentos em casa de vegetação sob condições controladas, um com a cultura do trigo e outro com a cultura da soja, utilizando-se colunas com amostras indeformadas de um Latossolo Vermelho argiloso. O delineamento experimental empregado, nos dois estudos, foi o de blocos completos ao acaso, em esquema fatorial 3×2 , com quatro repetições. Em cada experimento, os tratamentos foram: controle, gesso agrícola e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, sem e com a aplicação de fósforo (P), na forma de superfosfato triplo (SFT). A dose de gesso agrícola e de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro foi equivalente a 6 t ha^{-1} e a dose de P empregada na adubação foi de $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. As avaliações realizadas nas plantas de trigo e soja foram: atributos de raiz (área superficial, volume, diâmetro médio, comprimento total e massa seca), produção de massa seca da parte aérea e extração de nutrientes. Também foram avaliados e atributos químicos de solo (pH, Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , S-SO_4^{2-} e P extraído por solução de Mehlich-1 e resina trocadora de ânions) nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–30 cm de profundidade. Os tratamentos influenciaram os teores de P, Ca e SO_4^{2-} no solo, em ambos os experimentos. Quando utilizados de maneira independente, o gesso agrícola promoveu maior crescimento radicular de trigo quando comparado com o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro. Para a soja, os efeitos do gesso agrícola e do $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro foram semelhantes. A aplicação de $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ na semeadura do trigo e da soja proporcionou melhoria no desempenho radicular e aumentou a produção da parte aérea das culturas. A aplicação de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro juntamente com $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ na semeadura ocasionou melhoria no sistema radicular e na produção de massa seca da parte aérea de plantas de trigo, mas não interferiu na cultura da soja. Todavia, a utilização de gesso agrícola em conjunto com $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ na semeadura prejudicou o crescimento radicular e a produção de massa seca da parte aérea, principalmente na cultura do trigo. Portanto, concluiu-se que o P presente como impureza na composição do gesso agrícola influencia o desempenho produtivo das plantas de trigo e soja.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* (L.). *Glycine max* (L.) Merrill. Sulfato de cálcio. Fósforo. Fosfogesso. Crescimento radicular. Nutrição mineral.

EFFECT OF GYPSUM ON EFFICIENCY OF PHOSPHATE FERTILIZER FOR WHEAT AND SOYBEAN PLANTS

5.2 ABSTRACT

This work aimed to evaluate the influence of the application of gypsum on the efficiency of phosphate fertilization of wheat and soybean, under greenhouse conditions. In this study, in addition to agricultural gypsum, pure calcium sulphate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) was used to eliminate the influence of impurities from the agricultural gypsum. Two experiments were carried out in a greenhouse under controlled conditions, one with the wheat crop and the other with the soybean crop, using columns with undisturbed samples of a clayey Oxisol. The experimental design used in the two studies was a randomized complete block design, in a 3×2 factorial scheme, with four replications. In each experiment, the treatments were: control, agricultural gypsum and pure $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, without and with the application of phosphorus (P), in the form of triple superphosphate (TSP). The rate of agricultural gypsum and pure $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ was equivalent to 6 t ha^{-1} and the rate of P used in fertilization was $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. The evaluations carried out in wheat and soybean plants were: root attributes (surface area, volume, mean diameter, total length and dry mass), shoot dry mass production and nutrient extraction. Soil chemical attributes (pH, Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , S-SO_4^{2-} and P extracted with Mehlich-1 solution and anion exchange resin) were also evaluated in the 0–10, 10–20 and 20–30 cm deep. The treatments influenced the levels of P, Ca and SO_4^{2-} in the soil, in both experiments. When used independently, the gypsum promoted greater root growth of wheat when compared to pure $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. For soybean, the effects of agricultural gypsum and pure $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ were similar. The application of $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ in wheat and soybean sowing provided an improvement in root performance and increased shoot yield. Application of pure $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ together with $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ at sowing resulted in improved root system and dry matter yield of the wheat, but did not interfere with soybean plants. However, the use of agricultural gypsum together with $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ at sowing impaired root growth and shoot dry matter production, mainly in the wheat crop. Therefore, it was possible concluded that P present as impurity in the composition of the agricultural gypsum influences the productive performance of wheat and soybean plants.

Keywords: *Triticum aestivum* (L.). *Glycine max* (L.) Merrill. Calcium sulfate. Phosphorus. Phosphogypsum. Root growth. Mineral nutrition.

5.3 INTRODUÇÃO

A utilização do gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como insumo agrícola se difundiu no Brasil a partir da década de 1980 (RITCHEY et al., 1980; SUMNER et al., 1986). Atualmente, o gesso agrícola é considerado um importante insumo utilizado no fornecimento de cálcio (Ca) e enxofre (S), e também como condicionador de subsuperfície (CAIRES et al., 2001; 2002; 2003; 2006a; 2011a,b; RAMPIM et al., 2011; 2013; 2015; ZANDONÁ et al., 2015).

Os sistemas de produção agrícola no Estado do Paraná mudaram a partir da década de 1970 com o estabelecimento do sistema plantio direto, visando minimizar perdas de solo e de nutrientes por erosão. Diversos estudos nesse sistema mostraram efeitos limitados da calagem às camadas superficiais do solo (CAIRES et al., 2006b; MORAES et al., 2007) – uma vez que a correção da acidez é realizada sem incorporação em SPD (CAIRES et al., 2000). Vários trabalhos têm demonstrado que o gesso agrícola, quando aplicado na superfície do solo em plantio direto, movimenta-se para as camadas do subsolo e, como resultado, há aumento no suprimento de Ca e redução na toxicidade por Al em camadas subsuperficiais, favorecendo o aprofundamento do sistema radicular e a absorção de água e nutrientes pelas plantas (CAIRES et al., 1999, 2003; 2016; FAGERIA & MOREIRA, 2011; RAMPIM & LANA, 2015; SUMNER et al., 1986)

Por ser um resíduo das indústrias de fertilizantes fosfatados, o gesso agrícola apresenta impurezas em sua composição, podendo apresentar cerca de 6,0 a 7,5 g kg⁻¹ de P_2O_5 (VITTI et al., 2008). Alguns estudos têm evidenciado que doses elevadas deste insumo podem proporcionar aumentos significativos de fósforo (P) no solo e, também, maior concentração do nutriente nas plantas (CAIRES et al., 2003; 2011b; RAMPIM et al., 2013).

O P é um elemento essencial às plantas, sendo um dos nutrientes que mais afeta o crescimento radicular (FAGERIA, 2013; FAGERIA & MOREIRA, 2011). Além disso, sua deficiência pode acarretar redução de perfilhos em trigo e menor fixação biológica de N_2 em soja (ARAÚJO & MACHADO, 2006). Entretanto, quando adicionado ao solo por meio de fertilizantes fosfatados, o P apresenta baixo aproveitamento pelas plantas, devido, principalmente, à adsorção deste elemento aos colóides do solo (BROGGI et al., 2010). Como consequência, a adubação fosfatada tem sido realizada em doses mais elevadas para tentar suprir a demanda de P das culturas – o que acaba gerando custos excessivos ao agricultor (SANTOS et al., 2008). Vale ressaltar que os preços dos fertilizantes fosfatados têm aumentando a cada ano (ANDA, 2016; SAAB & PAULA, 2008) e, por isso, o fornecimento

de P através do gesso agrícola poderia causar economia na adubação fosfatada e, também, aumentar a eficiência do uso do P com a melhoria do ambiente radicular. Todavia, os incrementos de P no solo e nas plantas, por meio da aplicação do gesso agrícola, ainda não estão completamente esclarecidos, permanecendo dúvidas se os benefícios relatados têm relação direta ou indireta com o uso do insumo.

Esse trabalho objetivou avaliar, em casa de vegetação, a influência da aplicação de gesso na eficiência da adubação fosfatada de plantas de trigo e soja, utilizando-se, além do gesso agrícola, o sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) puro, com intuito de eliminar a interferência do resíduo de P proveniente do gesso agrícola.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Localização e caracterização experimental

Foram realizados dois experimentos em casa de vegetação sob condições controladas, pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Ponta Grossa, cujas coordenadas geográficas são 25°05'25"S, 50°06'12"W e 905 m de altitude. O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 2013) textura argilosa (o mesmo solo empregado nos experimentos em campo, Capítulos 3 e 4).

O solo foi coletado em colunas de policloreto de vinila (PVC), conforme metodologia proposta por Joris et al. (2013). Os tubos de PVC tinham 0,30 m de altura e 0,15 m de diâmetro. As colunas em PVC foram enterradas no solo com o auxílio de um caminhão caçamba basculante com acionamento hidráulico, de maneira que a força aplicada para a elevação da caçamba foi utilizada para enterrar os tubos no solo. Após, as colunas de solo foram retiradas escavando-se as laterais e transportadas para a casa de vegetação.

As colunas de solo foram coletadas da área em 20 de maio de 2015 para a condução do experimento com a cultura do trigo e, em 15 de março de 2016 para a condução do experimento com a cultura da soja. Os resultados das análises químicas do solo nas profundidades de 0–10, 10–20 e 20–30 cm, antes da implantação dos experimentos com trigo e soja, encontram-se na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados das análises químicas do solo antes da coleta das colunas no campo.

Camada ----cm----	pH CaCl ₂	Al ³⁺ -----mmol _c dm ⁻³ -----	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P Mehlich-1 -----mg dm ⁻³ -----	SO ₄ ²⁻ (1)	V ⁽²⁾ -----%-----	m ⁽³⁾	C
<i>Experimento com trigo</i>										
0–10	4,7	2	46	9	4,4	17,7	10,1	45,2	3,3	23
10–20	4,7	3	31	10	2,2	2,1	11,4	16,5	6,5	17
20–30	4,4	10	14	4	1,1	0,8	13,5	20,1	29,3	16
<i>Experimento com soja</i>										
0–10	4,9	1	41	21	4,6	13,0	10,5	47,0	1,3	26
10–20	4,5	10	17	7	3,0	9,3	15,5	15,4	27,0	19
20–30	4,3	10	9	5	2,5	1,5	23,0	14,3	37,7	16

(1)SO₄²⁻ = enxofre sulfato extraído com solução de fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹; (2)V = saturação por bases; (3)m = saturação por alumínio.

5.4.2 Delineamento experimental e tratamentos

Os experimentos foram realizados no delineamento em blocos ao acaso, em esquema fatorial 3×2 , com quatro repetições. Em cada experimento, os tratamentos foram: controle, gesso agrícola e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, sem e com a aplicação de P, na forma de superfosfato triplo (SFT). A dose de gesso agrícola e de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro foi equivalente a 6 t ha^{-1} (aplicada em área total) e a dose de P empregada na adubação foi de $90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, aplicada simulando-se o sulco de semeadura. O SFT utilizado foi o granulado e tinha a seguinte composição: 460, 380 e 130 g kg^{-1} de P_2O_5 total, P_2O_5 solúvel em água e CaO, respectivamente. O gesso agrícola (pó, in natura) continha 227, 181 e 17 g kg^{-1} de Ca, S- SO_4^{2-} e P_2O_5 , respectivamente, e 152 g kg^{-1} de teor de água. O $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro apresentou pureza de 980 g kg^{-1} .

5.4.3 Condução dos experimentos

A semeadura da soja (cv. Nidera 5909 RG) e do trigo (cv. OR/Biotrigo Supera) foi realizada colocando-se seis sementes de soja e oito sementes de trigo em cada coluna, no sulco de semeadura, 2 a 3 cm acima do fertilizante fosfatado. A aplicação do gesso agrícola e do $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro foi realizada sete dias antes da semeadura e a adubação fosfatada foi feita no momento da semeadura. Após a emergência das plântulas, foi realizado o desbaste mantendo duas plantas de soja e quatro plantas de trigo por coluna. A necessidade de água foi estabelecida de acordo com a evapotranspiração (ET) diária da cultura, sendo regulada conforme os estádios de desenvolvimento das plantas. Para o trigo, a ET diária foi estabelecida entre 2 a 6 mm dia^{-1} (CUNHA et al., 2009) e, para a soja, entre 3 a 8 mm dia^{-1} (FARIAS et al., 2009). Porém, a quantidade efetiva de água necessária foi aplicada de uma a duas vezes por semana (sistema de irrigação por aspersão), com intuito de simular condições naturais de precipitação ocorridas no campo.

5.4.4 Avaliações

Aos respectivos 50 e 55 dias após a emergência, as plantas de trigo e soja foram cortadas na base, lavadas em água deionizada, colocadas para secar em estufa a 60°C e, posteriormente, pesadas para a determinação da massa seca (MS) da parte aérea. Para o trigo, pouco antes do corte das plantas, foi realizada a contagem do número de perfilhos por planta

em cada tratamento. O trigo encontrava-se no início do espigamento, enquanto a soja, no início da formação de vagens (estádio R3). Depois, as amostras foram moídas para a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn, utilizando-se a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997). A extração dos nutrientes foi determinada multiplicando-se a concentração dos nutrientes pela MS da parte aérea.

Logo após a retirada das plantas, em ambos os experimentos, as colunas foram seccionadas nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–30 cm, retirando-se uma pequena porção de solo de cada camada para a realização de análise química da fertilidade, conforme descrito no item 3.4.4.3 (Capítulo 3). Em seguida, essas amostras foram lavadas em água corrente para a dispersão do solo, sendo os procedimentos para a determinação dos atributos radiculares realizados de acordo com o descrito no item 3.4.4.2 do Capítulo 3. Nos experimentos em colunas de solo foi possível determinar as concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn nas raízes de trigo e soja, seguindo a metodologia de Malavolta et al. (1997). O acúmulo de nutrientes nas raízes foi obtido pela multiplicação da concentração dos nutrientes pela massa seca de raiz (MSR). A eficiência do uso do P (EUP) foi calculada de acordo com a fórmula descrita no item 3.4.5 (Capítulo 3).

5.4.5 Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos às análises de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%. Na ausência de interação significativa entre os tratamentos com gesso (controle, gesso agrícola e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro) e P (controle e 90 kg ha^{-1} de P_2O_5) foram consideradas as médias das observações e, no caso de interação significativa, realizou-se os desdobramentos. As análises estatísticas foram realizadas por meio da utilização do programa Sisvar versão 5.6 (FERREIRA, 2014). Coeficientes de correlação de Pearson (r) foram calculados entre: (i) os atributos de raízes e os atributos químicos de solo; (ii) os nutrientes acumulados nas raízes e o comprimento radicular por área; (iii) os nutrientes acumulados nas raízes e a produção de MSR; (iv) a produção de MS da parte aérea e a extração de nutrientes; e (v) a produção de MS da parte aérea e os atributos de raízes (densidade de comprimento e comprimento radicular por área). As correlações foram calculadas com a utilização do programa SPSS Statistics Base versão 22.0 (IBM, 2013).

5.5 RESULTADOS

5.5.1 Alterações nos atributos químicos dos solos

5.5.1.1 Atributos do solo após a retirada do trigo

Não houve interação entre os tratamentos para os atributos químicos do solo avaliados em todas as profundidades amostradas (0–10, 10–20 e 20–30 cm). Na Tabela 5.2 são mostrados os efeitos independentes dos tratamentos no solo, após a retirada do trigo.

A acidez ativa (pH), a acidez trocável (Al^{3+}) e a saturação por alumínio (m%) não foram influenciadas pelos tratamentos aplicados no solo, em nenhuma camada avaliada. Os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e SO_4^{2-} não foram influenciados pela aplicação de P na semeadura, em nenhuma profundidade amostrada. Todavia, os teores de Ca^{2+} foram significativamente maiores na camada mais superficial do solo (0–10 cm), com a aplicação de gesso e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, e a relação Ca:Mg também foi influenciada na camada de 0–10 cm, apresentando maiores valores com a aplicação de gesso e de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro. Os teores de Mg^{2+} e K^+ não foram alterados com a aplicação de gesso agrícola e de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, em nenhuma profundidade amostrada.

A aplicação de P, independentemente do gesso, aumentou os teores de P na camada de 0–10 cm, pelos extratores de Mehlich-1 e resina trocadora de ânions (RTA). Também foram verificados maiores teores de P na camada superficial (0–10 cm) com a aplicação de gesso agrícola, pelos dois procedimentos de extração. Maiores teores de SO_4^{2-} foram observados nas camadas de 0–10 e 10–20 cm com a utilização de gesso e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro.

Tabela 5.2 – Atributos químicos do solo após aplicação de fósforo na semeadura de trigo em colunas de solo e da aplicação de condicionadores em pré-semeadura.

Tratamento	pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	P	SO ₄ ²⁻	m ⁽¹⁾	Ca:Mg
	CaCl ₂	-----mmol _c dm ⁻³ -----				Mehlich	Resina		%	
						-----mg dm ⁻³ -----				
<i>Camada de 0–10 cm</i>										
<i>Fósforo (P₂O₅)</i>										
Controle	4,8 a	2,3 a	56,0 a	20,1 a	3,1 a	8,3 b	17,9 b	73,3 a	3,3 a	2,8 a
Com P ⁽²⁾	4,8 a	1,7 a	61,8 a	23,4 a	3,2 a	16,2 a	26,6 a	72,8 a	1,9 a	2,6 a
DMS	0,1	1,1	14,3	4,3	0,9	2,6	6,3	12,4	2,5	0,6
<i>Condicionadores</i>										
Controle	4,8 a	2,3 a	48,1 b	22,0 a	3,2 a	9,2 b	20,4 b	10,6 b	3,3 a	2,1 b
Gesso ⁽³⁾	4,9 a	1,9 a	67,3 a	20,9 a	3,4 a	15,3 a	26,4 a	106,1 a	2,3 a	3,2 a
CaSO ₄ .2H ₂ O puro ⁽³⁾	4,8 a	1,9 a	61,3 a	22,4 a	2,7 a	12,2 b	20,0 b	100,9 a	2,3 a	2,7 a
DMS	0,2	1,7	11,3	6,5	1,3	3,0	5,4	18,6	1,6	0,5
CV (%)	3,1	22,2	27,9	23,1	22,9	24,7	22,8	19,8	20,6	25,4
<i>Camada de 10–20 cm</i>										
<i>Fósforo (P₂O₅)</i>										
Controle	4,6 a	12,0 a	23,7 a	12,3 a	2,3 a	1,9 a	9,2 a	25,0 a	26,2 a	1,9 a
Com P	4,7 a	10,3 a	25,1 a	13,3 a	2,4 a	1,9 a	9,3 a	24,2 a	21,2 a	1,9 a
DMS	0,1	2,3	7,5	3,4	0,6	0,6	1,8	8,7	5,5	0,3
<i>Condicionadores</i>										
Controle	4,6 a	11,5 a	22,3 a	11,4 a	2,2 a	1,5 a	8,9 a	12,0 b	26,2 a	2,0 a
Gesso	4,7 a	11,4 a	25,0 a	12,6 a	2,4 a	1,7 a	9,1 a	27,3 a	22,6 a	2,0 a
CaSO ₄ .2H ₂ O puro	4,7 a	11,3 a	25,9 a	14,5 a	2,4 a	2,4 a	9,9 a	34,4 a	22,3 a	1,8 a
DMS	0,2	2,7	11,2	5,0	1,0	1,0	2,7	12,9	6,4	0,5
CV (%)	3,3	28,9	25,3	25,1	28,9	31,3	22,7	30,6	32,9	19,8
<i>Camada de 20–30 cm</i>										
<i>Fósforo (P₂O₅)</i>										
Controle	4,4 a	16,5 a	12,2 a	8,3 a	1,9 a	0,7 a	7,2 a	17,0 a	43,4 a	1,4 a
Com P	4,5 a	16,2 a	13,0 a	9,2 a	2,0 a	0,9 a	7,5 a	16,3 a	40,3 a	1,4 a
DMS	0,1	1,9	2,7	1,8	0,6	0,3	1,4	3,8	6,4	0,3
<i>Condicionadores</i>										
Controle	4,4 a	15,4 a	11,9 a	8,3 a	1,7 a	0,6 a	6,7 a	15,3 a	41,6 a	1,4 a
Gesso	4,5 a	16,1 a	12,5 a	9,0 a	2,1 a	0,8 a	7,1 a	16,7 a	41,6 a	1,4 a
CaSO ₄ .2H ₂ O puro	4,5 a	17,5 a	13,4 a	8,9 a	2,1 a	0,9 a	8,2 a	17,9 a	42,2 a	1,5 a
DMS	0,1	2,9	4,0	2,6	0,9	0,4	2,1	5,7	6,6	0,5
CV (%)	2,2	14,1	24,7	23,1	16,1	27,4	21,9	16,6	18,6	23,4

⁽¹⁾ m% = saturação por alumínio. ⁽²⁾ 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato triplo. ⁽³⁾ Aplicação de 6,0 t ha⁻¹. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

5.5.1.2 Atributos do solo após a retirada da soja

A análise de variância não revelou interação significativa para os atributos químicos do solo avaliados nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–30 cm. Na Tabela 5.3 estão apresentados os efeitos independentes dos tratamentos, após a coleta das plantas de soja.

A acidez ativa e a acidez trocável não foram alteradas pelos tratamentos, em todas as profundidades amostradas (0–10, 10–20 e 20–30 cm). Porém, independentemente do P, a m% reduziu com a aplicação de gesso e de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro na camada mais superficial do solo (0–10 cm). Os teores de Ca^{2+} foram maiores na camada mais superficial do solo (0–10 cm) com a adição de gesso e de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro. Já, o Mg^{2+} foi significativamente reduzido nas camadas superficiais, de 0–10 e 10–20 cm, com a aplicação de gesso. Todavia, observou-se que os teores de Mg^{2+} foram maiores com a aplicação de gesso na camada mais profunda (20–30 cm), indicando a movimentação vertical do cátion. Em consequência desses efeitos, houve aumento da relação Ca:Mg, observado na camada mais superficial do solo (0–10 cm).

Os teores de P no solo extraídos por Mehlich-1 e pela RTA foram maiores com a aplicação de P na semeadura, e também com a aplicação de gesso agrícola, somente na camada mais superficial do solo (0–10 cm). Nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, os teores de SO_4^{2-} foram maiores com a aplicação de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, seguido do gesso agrícola. Já, na camada mais profunda (20–30 cm), o aumento do SO_4^{2-} foi similar para o gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro. Nota-se que, os teores de SO_4^{2-} não variaram com a aplicação do P na semeadura, em nenhuma das camadas amostradas (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Atributos químicos do solo após aplicação de fósforo na semeadura da soja em colunas de solo e da aplicação de condicionadores em pré-semeadura.

Camadas de solo e da aplicação de condicionadores em pre semeadura.										
Tratamento	pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P Mehlich	P Resina	SO ₄ ²⁻	m ⁽¹⁾	Ca:Mg
	CaCl ₂	-----mmol _c dm ⁻³ -----				-----mg dm ⁻³ -----			%	
Camada de 0–10 cm										
Fósforo (P ₂ O ₅)										
Controle	4,9 a	1,4 a	72,9 a	25,3 a	3,4 a	9,4 b	19,8 b	75,5 a	1,6 a	2,9 a
Com P ⁽²⁾	4,8 a	1,4 a	73,3 a	28,0 a	3,9 a	12,0 a	24,3 a	76,0 a	1,6 a	2,6 a
DMS	0,3	0,4	16,4	3,4	0,9	2,3	4,0	16,3	0,5	0,6
Condicionadores										
Controle	4,8 a	1,9 a	51,0 b	27,6 a	3,7 a	9,6 b	20,0 b	8,1 c	2,4 a	1,8 b
Gesso ⁽³⁾	4,8 a	1,2 a	83,0 a	23,8 b	3,4 a	12,6 a	24,4 a	97,3 b	1,2 b	3,5 a
CaSO ₄ .2H ₂ O puro ⁽³⁾	4,9 a	1,1 a	85,3 a	28,6 a	3,8 a	9,8 b	21,9 b	121,9 a	1,2 b	3,0 a
DMS	0,4	0,5	24,5	3,7	1,4	2,5	3,6	24,3	0,6	0,9
CV (%)	5,6	18,8	25,8	14,4	29,6	26,7	24,7	22,3	28,4	24,8
Camada de 10–20 cm										
Fósforo (P ₂ O ₅)										
Controle	4,5 a	10,8 a	28,0 a	21,4 a	1,9 a	3,3 a	12,4 a	32,2 a	17,6 a	1,3 a
Com P	4,6 a	10,3 a	32,7 a	23,3 a	2,3 a	4,5 a	14,1 a	39,4 a	15,7 a	1,4 a
DMS	0,1	3,0	6,5	5,5	0,7	1,6	3,2	4,5	3,6	0,9
Condicionadores										
Controle	4,5 a	9,8 a	28,1 a	22,8 ab	2,2 a	3,1 a	12,1 a	6,9 c	17,4 a	1,2 a
Gesso	4,6 a	11,3 a	30,3 a	18,4 b	1,9 a	4,4 a	14,3 a	37,9 b	17,1 a	1,6 a
CaSO ₄ .2H ₂ O puro	4,6 a	10,6 a	32,6 a	26,0 a	2,1 a	4,2 a	13,4 a	62,6 a	15,4 a	1,3 a
DMS	0,2	4,5	9,6	7,2	1,1	2,4	2,6	20,2	3,7	1,3
CV (%)	2,9	26,0	24,4	28,1	31,0	28,2	27,0	23,4	34,8	27,7
Camada de 20–30 cm										
Fósforo (P ₂ O ₅)										
Controle	4,3 a	17,8 a	10,8 a	18,5 a	1,5 a	0,2 a	5,1 a	16,7 a	37,8 a	0,6 a
Com P	4,3 a	18,2 a	13,0 a	17,6 a	1,8 a	0,3 a	5,6 a	17,5 a	36,0 a	0,7 a
DMS	0,1	2,6	2,5	3,4	0,4	0,2	1,4	4,5	4,3	0,2
Condicionadores										
Controle	4,3 a	17,8 a	11,1 a	14,6 b	1,7 a	0,2 a	4,9 a	12,0 b	39,5 a	0,8 a
Gesso	4,3 a	17,9 a	12,3 a	21,9 a	1,6 a	0,3 a	5,8 a	19,0 a	34,0 a	0,6 a
CaSO ₄ .2H ₂ O puro	4,3 a	18,5 a	12,4 a	17,6 b	1,7 a	0,2 a	5,4 a	19,3 a	36,2 a	0,7 a
DMS	0,1	3,8	3,7	3,3	0,6	0,2	2,0	5,6	6,4	0,4
CV (%)	1,9	16,2	24,8	22,8	29,4	29,5	29,3	25,1	11,7	29,7

⁽¹⁾ m% = saturação por alumínio. ⁽²⁾ 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato triplo. ⁽³⁾ Aplicação 6,0 t ha⁻¹. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

5.5.2 Atributos radiculares do trigo e da soja

5.5.2.1 Massa seca das raízes

A produção de massa seca de raízes (MSR) de trigo foi influenciada pela interação entre os tratamentos nas camadas amostradas de 10–20 e 20–30 cm (Tabela 5.4). Na camada mais superficial (0–10 cm), os tratamentos não influenciaram significativamente essa variável. A interação significativa na camada de 10–20 cm demonstrou que, na ausência de P, o gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro ocasionaram maior produção de MSR, mas na presença do P, a MSR não foi influenciada pelos condicionadores. Nessa camada (10–20 cm), a interação também revelou que o P aumentou a produção da MSR de trigo no controle sem gesso e em conjunto com o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, enquanto que em conjunto com o gesso, o P não influenciou a MSR.

Na maior profundidade amostrada (20–30 cm), o gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro proporcionaram aumento na MSR na ausência de P, mas não alteraram a MSR na presença de P. A interação para essa camada também revelou que o P, no controle sem gesso, promoveu acréscimo na MSR. Todavia, o P em conjunto com gesso, causou significativa redução na MSR de trigo, enquanto que em conjunto com o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, não alterou a MSR (Tabela 5.4).

Para a MSR de soja, houve interação entre os tratamentos apenas na camada mais profunda amostrada (20–30 cm). Nas demais camadas (0–10 e 10–20 cm), não houve influência dos tratamentos na MSR de soja (Tabela 5.4). A interação na camada 20–30 cm revelou que, na ausência do P, o tratamento com o gesso proporcionou maior MSR, mas com a adição do P, o gesso promoveu significativa redução na MSR de soja. Por outro lado, no controle sem gesso, o P também promoveu aumento na MSR. Entretanto, com gesso, o P reduziu a MSR e, com o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, não alterou a MSR.

Tabela 5.4 – Produção de massa seca de raízes (mg planta⁻¹) de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.

Fósforo (P ₂ O ₅)	Condicionadores			Média	CV (%)
	Controle	Gesso ⁽¹⁾	CaSO ₄ .2H ₂ O puro ⁽¹⁾		
<i>Raízes de Trigo</i>					
	<i>Camada de 0–10 cm</i>				
Controle	322,3	315,3	287,9	308,5 a	16,4
Com P ⁽²⁾	326,8	280,8	281,5	296,4 a	
Média	324,6 A	298,0 A	284,7 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>				
Controle	59,7 Bb	98,1 Aa	79,8 Ab	79,2	12,1
Com P	101,4 Aa	90,2 Aa	102,2 Aa	97,9	
Média	80,5	94,1	91,0		
	<i>Camada de 20–30 cm</i>				
Controle	29,8 Bb	80,8 Aa	57,5 Aa	56,0	16,0
Com P	53,3 Aa	58,7 Ab	54,4 Aa	55,5	
Média	41,5	69,7	56,0		
<i>Raízes de Soja</i>					
	<i>Camada de 0–10 cm</i>				
Controle	221,8	266,8	258,3	248,9 a	16,7
Com P ⁽²⁾	229,7	258,3	218,5	235,5 a	
Média	225,7 A	262,5 A	238,4 A		
	<i>Camada de 10–20 cm</i>				
Controle	91,7	115,5	103,0	103,4 a	18,9
Com P	116,3	91,5	107,2	105,0 a	
Média	104,0 A	103,5 A	105,1 A		
	<i>Camada de 20–30 cm</i>				
Controle	75,0 Bb	100,0 Aa	79,8 Ba	84,9	19,8
Com P	89,8 Aa	58,5 Bb	84,3 Aa	77,5	
Média	82,4	79,3	82,1		

⁽¹⁾Aplicação de 6,0 t ha⁻¹. ⁽²⁾90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

5.5.2.2 Volume das raízes

O volume de raízes de trigo foi influenciado pela interação entre os tratamentos em todas as camadas de solo avaliadas (0–10, 10–20 e 20–30 cm) (Tabela 5.5). A interação na camada de 0–10 cm revelou que, na ausência de P, o gesso e o CaSO₄.2H₂O puro promoveram aumentos significativos no volume de raízes. Porém, com a adição de P, o gesso ocasionou significativa redução no volume de raízes, e o CaSO₄.2H₂O puro não interferiu no volume de raízes. A interação também mostrou que o P, no controle sem gesso, promoveu aumento no volume radicular, mas em conjunto com o gesso ocasionou significativa redução

no volume de raízes. Porém, quando em conjunto ao $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, o P não influenciou o volume de raízes.

Na camada de 10–20 cm, o desdobramento da interação mostrou que, na ausência de P, o gesso promoveu maior volume de raízes, seguido pelo $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro. Porém, junto com P, o gesso ocasionou redução no volume radicular e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro não alterou o volume de raízes. Por outro lado, a adição de P, no controle sem gesso, ocasionou aumento no volume radicular de trigo. Porém, a adição de P em conjunto com gesso reduziu o volume de raízes e, em conjunto com $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, não influenciou o volume radicular (Tabela 5.5).

A interação na camada mais profunda (20–30 cm) revelou que, na ausência de P, o gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro aumentaram o volume de raízes de trigo. Contudo, com a adição de P, o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro proporcionou volume radicular maior em relação ao gesso e ao tratamento controle. Por outro lado, o desdobramento também revelou que o P em conjunto com gesso promoveu significativa redução no volume radicular, enquanto que, em conjunto com $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ PA, promoveu aumento no volume de raízes (Tabela 5.5).

Para o volume radicular da soja, houve interação significativa entre os tratamentos apenas na camada de 20–30 cm. Nas camadas de 0–10 e 10–20 cm houve efeito independente dos tratamentos. Na camada mais superficial (0–10 cm), o volume radicular foi maior com a adição de gesso e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, independentemente do P, e na camada de 10–20 cm, o volume radicular foi maior com a adição de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, uma vez que o gesso não diferiu dos demais tratamentos (controle e com $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro) (Tabela 5.5).

Na camada mais profunda (20–30 cm), o desdobramento revelou que, na ausência de P, o gesso promoveu aumento no volume radicular da soja, e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro não diferiu dos tratamentos (controle e com gesso). Todavia, na presença de P, o gesso ocasionou significativa redução no volume de raízes. A interação para essa camada também mostrou que, no controle sem gesso, a adição de P aumentou o volume radicular, mas em conjunto com gesso, a adição de P reduziu significativamente o volume de raízes. A adição de P em conjunto com o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro não influenciou o volume de raízes de soja (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Volume ($\text{mm}^3 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.

Fósforo (P ₂ O ₅)	Condicionadores			Média	CV (%)
	Controle	Gesso ⁽¹⁾	CaSO ₄ .2H ₂ O puro ⁽¹⁾		
Raízes de Trigo					
		Camada de 0–10 cm			
Controle	3,15 Bb	11,00 Aa	7,11 Aa	7,09	13,0
Com P ⁽²⁾	9,08 Aa	5,96 Bb	8,95 Aa	8,00	
Média	6,12	8,48	8,03		
		Camada de 10–20 cm			
Controle	2,48 Cb	10,09 Aa	5,49 Ba	6,02	13,8
Com P	9,10 Aa	5,89 Bb	6,46 ABa	7,15	
Média	5,79	7,99	5,97		
		Camada de 20–30 cm			
Controle	6,66 Ba	13,75 Aa	12,23 Ab	10,88	16,8
Com P	7,79 Ba	9,31 Bb	19,46 Aa	12,19	
Média	7,23	11,53	15,84		
Raízes de Soja					
		Camada de 0–10 cm			
Controle	2,11	2,90	2,86	2,62 a	28,0
Com P ⁽²⁾	2,44	2,58	2,47	2,49 a	
Média	2,28 B	2,74 A	2,67 A		
		Camada de 10–20 cm			
Controle	1,59	2,93	3,04	2,52 a	32,2
Com P	1,95	1,89	2,15	2,00 a	
Média	1,77 B	2,41 AB	2,59 A		
		Camada de 20–30 cm			
Controle	1,76 Bb	3,63 Aa	2,41 ABa	2,60	30,2
Com P	3,40 Aa	1,89 Bb	3,02 Aa	2,77	
Média	2,58	2,76	2,71		

⁽¹⁾Aplicação de 6,0 t ha⁻¹. ⁽²⁾90 kg ha⁻¹ de P_2O_5 na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p=0,05$).

5.5.2.3 Área superficial das raízes

Houve interação significativa para a área superficial de raízes de trigo nas camadas de 0–10 e 10–20 cm. Para a camada mais profunda (20–30 cm), houve efeitos independentes dos tratamentos (Tabela 5.6). Nessa camada, o gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro promoveram aumento na área superficial de raízes, e a adição de P, de maneira independente, também aumentou a área superficial de raízes.

A interação na camada de 0–10 cm mostrou que, na ausência de P, o gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro aumentaram a área superficial das raízes de trigo, mas na presença de P, o

gesso reduziu significativamente essa variável. O desdobramento também revelou que, no controle sem gesso, o P aumentou a área superficial de raízes de trigo. Todavia, a adição de P junto com gesso reduziu e, junto ao $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, não alterou a área superficial de raízes (Tabela 5.6).

A análise de variância na camada amostrada de 10–20 cm revelou que, na ausência de P, o gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro aumentaram a área superficial de raízes de trigo, mas o gesso reduziu significativamente essa variável na presença de P. No controle sem gesso, a adição de P aumentou a área superficial de raízes. Contudo, a adição de P combinada com a adição de gesso causou redução na área superficial de raízes, mas em conjunto com o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro aumentou a área superficial de raízes (Tabela 5.6).

Para a área superficial de raízes de soja, houve interação entre os tratamentos apenas na camada de 20–30 cm. Nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, o gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, de maneira independente, promoveram aumento na área superficial das raízes. A adição de P, independentemente dos tratamentos com gesso, não influenciou essa variável nas referidas camadas (0–10 cm e 10–20 cm) (Tabela 5.6). O desdobramento na camada de 20–30 cm revelou que, na ausência de P, o gesso proporcionou a maior a área superficial de raízes de soja e, na presença do P, os tratamentos não influenciaram essa variável. Por outro lado, o desdobramento também mostrou que a adição de P, no controle sem gesso, aumentou a área superficial das raízes. Contudo, houve significativa redução na área superficial de raízes quando o P foi adicionado em conjunto com o gesso agrícola, enquanto que o P, em conjunto com o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, não influenciou essa variável (Tabela 5.6).

5.5.2.4 Diâmetro médio das raízes

A análise de variância não revelou interação entre os tratamentos para o diâmetro de raízes de trigo e soja. Também não foram observados efeitos independentes do P e dos tratamentos com gesso, em todas as profundidades amostradas (0–10, 10–20 e 20–30 cm) (Tabela 5.7).

Tabela 5.6 – Área superficial ($\text{mm}^2 \text{ dm}^{-3}$) de raízes de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.

Fósforo (P ₂ O ₅)	Condicionadores			Média	CV (%)
	Controle	Gesso ⁽¹⁾	CaSO ₄ .2H ₂ O puro ⁽¹⁾		
Raízes de Trigo					
	Camada de 0–10 cm				
Controle	27,48 Bb	63,82 Aa	43,48 Aa	44,93	16,8
Com P ⁽²⁾	55,09 Aa	37,39 Bb	52,49 Aa	48,32	
Média	41,28	50,60	47,98		
	Camada de 10–20 cm				
Controle	15,89 Bb	48,02 Aa	33,40 Ab	32,44	26,7
Com P	49,37 Aa	31,56 Bb	48,29 Aa	39,74	
Média	32,64	39,79	35,84		
	Camada de 20–30 cm				
Controle	35,31	78,84	69,03	61,06 b	33,1
Com P	59,25	76,57	101,49	79,11 a	
Média	47,28 B	77,71 A	85,26 A		
Raízes de Soja					
	Camada de 0–10 cm				
Controle	5,15	10,20	14,04	9,8 a	19,0
Com P ⁽²⁾	9,69	14,14	15,12	12,9 a	
Média	7,42 B	12,17 A	14,58 A		
	Camada de 10–20 cm				
Controle	10,98	27,10	19,93	19,33 a	29,0
Com P	20,54	20,66	22,72	21,30 a	
Média	15,76 B	23,88 A	21,32 A		
	Camada de 20–30 cm				
Controle	8,33 Bb	64,63 Aa	38,04 Ba	37,00	34,8
Com P	26,08 Aa	24,03 Ab	34,75 Aa	28,29	
Média	17,20	44,33	36,39		

⁽¹⁾Aplicação de $6,0 \text{ t ha}^{-1}$. ⁽²⁾ 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p=0,05$).

Tabela 5.7 – Diâmetro médio (mm) de raízes de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.

Fósforo (P ₂ O ₅)	Condicionadores			Média	CV (%)
	Controle	Gesso ⁽¹⁾	CaSO ₄ .2H ₂ O puro ⁽¹⁾		
Raízes de Trigo					
	Camada de 0–10 cm				
Controle	1,43	1,61	1,60	1,55 a	7,0
Com P ⁽²⁾	1,51	1,65	1,55	1,57 a	
Média	1,47 A	1,63 A	1,58 A		
	Camada de 10–20 cm				
Controle	1,43	1,49	1,30	1,41 a	9,0
Com P	1,51	1,39	1,46	1,45 a	
Média	1,47 A	1,44 A	1,38 A		
	Camada de 20–30 cm				
Controle	1,41	1,46	1,57	1,48 a	9,5
Com P	1,35	1,47	1,66	1,49 a	
Média	1,38 A	1,47 A	1,61 A		
Raízes de Soja					
	Camada de 0–10 cm				
Controle	2,57	2,25	2,72	2,51 a	16,0
Com P	2,67	2,43	2,43	2,51 a	
Média	2,62 A	2,34 A	2,58 A		
	Camada de 10–20 cm				
Controle	1,82	1,45	1,47	1,58 a	8,5
Com P	1,39	1,46	1,44	1,43 a	
Média	1,61 A	1,45 A	1,46 A		
	Camada de 20–30 cm				
Controle	1,43	1,41	1,52	1,45 a	10,5
Com P	1,53	1,40	1,40	1,45 a	
Média	1,48 A	1,40 A	1,48 A		

⁽¹⁾Aplicação de 6,0 t ha⁻¹. ⁽²⁾90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

5.5.2.5 Densidade de comprimento das raízes

A densidade de comprimento de raízes (DCR) de trigo foi influenciada pela interação entre os tratamentos em todas as camadas de solo amostradas (0–10, 10–20 e 20–30 cm) (Tabela 5.8).

O desdobramento da interação na camada de 0–10 cm mostrou que, na ausência de P, o gesso proporcionou a maior DCR. Todavia, na presença de P, a adição de gesso promoveu expressiva redução na DCR. O desdobramento também revelou que, no controle sem gesso, a adição de P proporcionou aumento na DCR, mas quando o P foi aplicado em conjunto com

gesso, houve redução na DCR. A adição de P em conjunto com $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro não influenciou significativamente a DCR de trigo (Tabela 5.8).

Na camada de 10–20 cm, na ausência de P, o gesso proporcionou maior DCR e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro não diferiu dos tratamentos controle e com gesso. No controle sem gesso, a adição de P aumentou a DCR de trigo. Nessa camada de solo, não foi observada influência significativa da adição do P em conjunto com gesso e com $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro na DCR (Tabela 5.8).

Na camada mais profunda (20–30 cm), o desdobramento da interação revelou que os efeitos foram bastante similares aos ocorridos na camada de 10–20 cm. Exceto pelo fato que, nessa camada, observou-se que a adição de P em conjunto com $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro promoveu aumento na DCR de trigo (Tabela 5.8).

Para a DCR de soja, houve interação significativa entre os tratamentos apenas na camada mais profunda de 20–30 cm. Nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, independentemente do P, o gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro aumentaram a DCR de soja (Tabela 5.8).

Na camada de 20–30 cm, o desdobramento da interação mostrou que, na ausência de P, o gesso proporcionou maior DCR. Porém, na presença de P, apenas o gesso ocasionou significativa redução na DCR. No controle sem gesso, a adição de P aumentou a DCR, mas quando o P foi adicionado em conjunto com o gesso, essa variável foi significativamente reduzida. A adição de P em conjunto com $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro não alterou a DCR da soja (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Densidade de comprimento (m dm⁻³) de raízes de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.

Fósforo (P ₂ O ₅)	Condicionadores			Média	CV (%)
	Controle	Gesso ⁽¹⁾	CaSO ₄ .2H ₂ O puro ⁽¹⁾		
Raízes de Trigo					
	Camada de 0–10 cm				
Controle	63,0 Bb	131,0 Aa	79,7 Ba	91,2	14,2
Com P ⁽²⁾	113,0 Aa	79,5 Bb	93,5 Aa	95,3	
Média	88,0	105,2	86,6		
	Camada de 10–20 cm				
Controle	18,1 Bb	36,8 Aa	22,9 ABa	25,9	27,7
Com P	34,0 Aa	27,9 Aa	35,0 Aa	32,3	
Média	26,1	32,4	28,9		
	Camada de 20–30 cm				
Controle	16,0 Bb	47,7 Aa	33,5 ABb	32,4	22,6
Com P	35,9 Aa	44,2 Aa	43,1 Aa	41,0	
Média	26,0	45,9	38,3 A		
Raízes de Soja					
	Camada de 0–10 cm				
Controle	8,7	13,0	12,1	11,3 a	12,1
Com P ⁽²⁾	12,9	13,3	12,7	12,9 a	
Média	10,8 B	13,2 A	12,4 A		
	Camada de 10–20 cm				
Controle	7,6	11,7	10,9	10,1 a	13,9
Com P	8,0	9,7	10,7	9,5 a	
Média	7,8 B	10,7 A	10,9 A		
	Camada de 20–30 cm				
Controle	7,1 Bb	12,4 Aa	8,6 Ba	8,6	29,7
Com P	11,2 Aa	7,3 Bb	10,7 Aa	9,7	
Média	9,2	9,8	9,7		

⁽¹⁾Aplicação de 6,0 t ha⁻¹. ⁽²⁾90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato triplo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

5.5.2.6 Comprimento radicular total por área

Houve interação significativa entre os tratamentos com gesso e P para o comprimento radicular por área (CRA) de trigo e soja, até a profundidade de 30 cm (Figura 5.1a,b).

Para o trigo, a interação mostrou que, na ausência de P, o gesso proporcionou maior CRA. Todavia, na presença de P, o gesso ocasionou significativa redução no CRA e o CaSO₄.2H₂O puro não diferiu dos tratamentos controle e com gesso. A interação para o trigo também revelou que no controle sem gesso, a adição de P aumentou o CRA. Entretanto, a adição de P em conjunto com gesso causou redução no CRA do trigo, enquanto que o P

adicionado em conjunto com $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro promoveu aumento no CRA. Considerando a média dos tratamentos, para o CRA do trigo foi de 147 cm cm^{-2} ou $1,47 \text{ m cm}^{-2}$ (Figura 5.1a).

Para a soja, a interação dos tratamentos mostrou que, na ausência de P, o gesso proporcionou maior CRA e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro não diferiu dos tratamentos controle e com gesso. Já, na presença de P, a adição de gesso ou de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro não interferiram no CRA. Por outro lado, a adição de P, no controle sem gesso, aumentou o CRA, e em conjunto com gesso ou com $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, não alterou significativamente o CRA da soja. Considerando a média dos tratamentos, o CRA da soja foi de 31 cm cm^{-2} ou $0,31 \text{ m cm}^{-2}$ (Figura 5.1b).

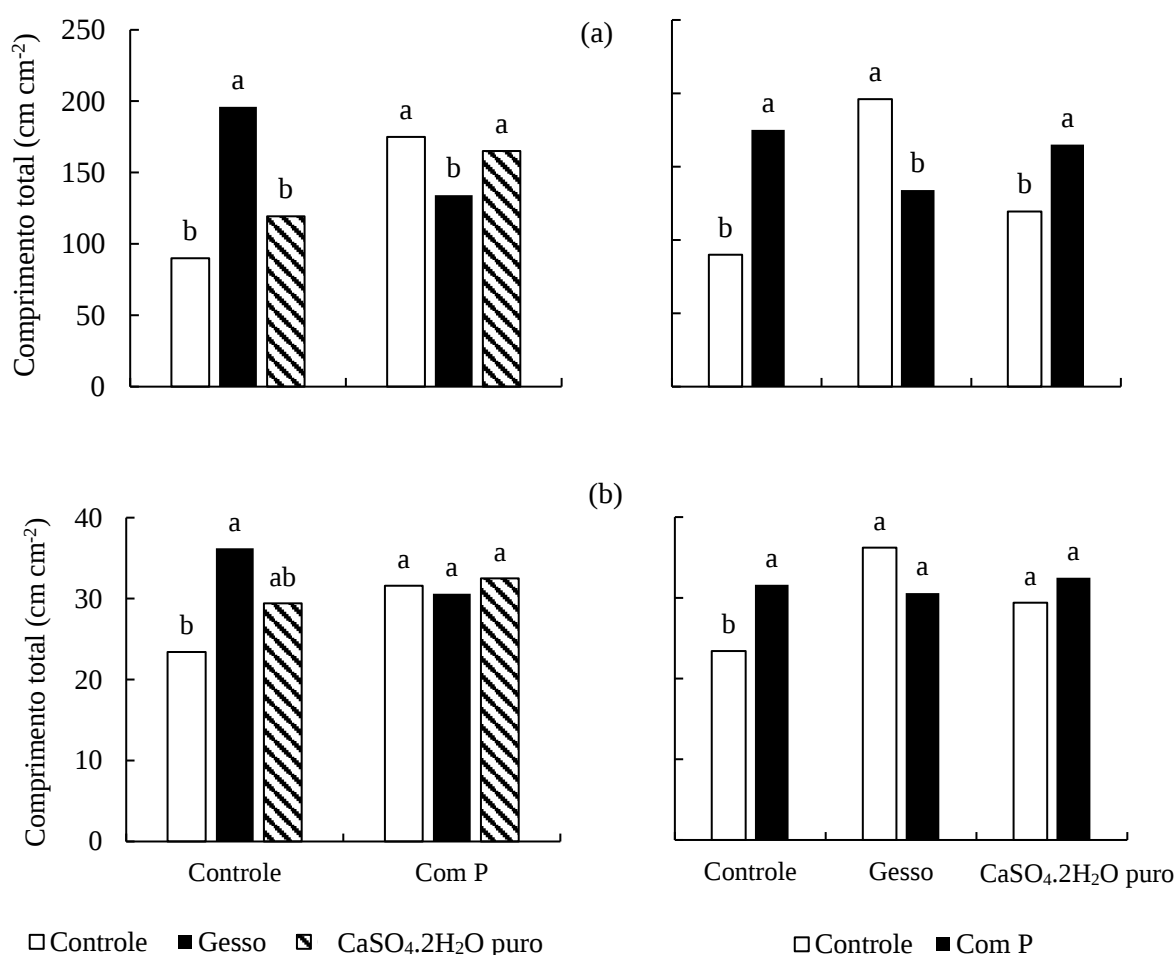


Figura 5.1 – Comprimento radicular por área (0–30 cm) de raízes de trigo (a) e soja (b) após a aplicação de fósforo ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) na semeadura e condicionadores em pré-semeadura. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p=0,05$).

Os coeficientes de correlação de Pearson entre atributos de raízes de trigo e soja e atributos químicos de solo são mostrados na Tabela 5.9. Para o trigo, a DCR se correlacionou positivamente com o P extraído pela RTA e o Mg^{2+} na camada de 0–10 cm; e com os teores de Ca^{2+} na camada de 20–30 cm. Já, o CRA de trigo, até 30 cm de profundidade, se correlacionou positivamente apenas com o Ca^{2+} e o P extraído pela RTA. A DCR de soja se correlacionou positivamente com o Mg^{2+} e o SO_4^{2-} na camada de 10–20 cm, e o CRA da soja, até 0–30 cm, também se correlacionou positivamente com esses mesmos atributos do solo (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes de trigo e soja e atributos químicos de solo.

Camada ---cm---	m%	Ca^{2+} ----mmol _c dm ⁻³ ----	Mg^{2+}	Ca:Mg	P Mehlich-1 -----mg dm ⁻³ -----	P Resina	SO_4^{2-}
<i>Trigo</i>							
<i>Densidade de comprimento (m dm⁻³)</i>							
0–10	-0,15 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,42*	-0,29 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,63**	0,09 ^{ns}
10–20	0,01 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,03 ^{ns}
20–30	-0,23 ^{ns}	0,42*	0,11 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,30 ^{ns}
<i>Comprimento radicular por área (cm cm⁻²)</i>							
0–30	-0,08 ^{ns}	0,49*	0,27 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,67**	0,14 ^{ns}
<i>Soja</i>							
<i>Densidade de comprimento (m dm⁻³)</i>							
0–10	0,09 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,21 ^{ns}
10–20	-0,27 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,43*	-0,10 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,56**
20–30	-0,28 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,28 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-0,35 ^{ns}
<i>Comprimento radicular por área (cm cm⁻²)</i>							
0–30	-0,16 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,42*	-0,12 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,46*

ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05. c = não foi possível calcular porque a variável (m%) foi constante.

5.5.3 Acúmulo de nutrientes nas raízes de trigo e soja

A análise de variância não demonstrou efeito significativo da interação entre os tratamentos para o acúmulo de nutrientes nas raízes de trigo e soja, avaliadas na profundidade até 30 cm. Os efeitos independentes dos tratamentos com P e gesso estão apresentados na Tabela 5.10.

A adição de P na semeadura promoveu maiores acúmulos de N, P, K e Mg nas raízes de trigo, e não influenciou os nutrientes nas raízes de soja. O gesso promoveu maiores acúmulos

de P e K nas raízes de trigo, enquanto que tanto o gesso quanto o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro aumentaram o acúmulo de S nas raízes de soja (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 – Nutrientes acumulados nas raízes (0–30 cm) de trigo e soja, após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----mg planta ⁻¹ -----					-----µg planta ⁻¹ -----				
Raízes de Trigo										
Fósforo (P ₂ O ₅)										
Controle	5,3 b	0,25 b	0,03 b	1,4 a	0,18 b	0,55 a	9,5 a	2.209 a	12,4 a	18,6 a
Com P ⁽¹⁾	6,0 a	0,47 a	0,13 a	1,7 a	0,30 a	0,61 a	9,9 a	2.711 a	14,7 a	23,1 a
DMS	0,7	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	1,6	777,9	2,7	5,8
Condicionadores										
Controle	5,7 a	0,31 b	0,04 b	1,4 a	0,22 a	0,57 a	11,0 a	2.094 a	12,7 a	21,6 a
Gesso ⁽²⁾	5,9 a	0,46 a	0,16 a	1,6 a	0,27 a	0,63 a	9,0 a	2.484 a	13,6 a	21,1 a
CaSO ₄ .2H ₂ O puro ⁽²⁾	5,4 a	0,31 b	0,03 b	1,7 a	0,23 a	0,52 a	9,1 a	2.801 a	14,4 a	19,8 a
DMS	1,0	0,1	0,2	0,7	0,1	0,1	2,5	1.160	4,0	8,6
CV (%)	13,9	31,1	38,2	33,2	37,8	21,3	19,4	36,3	23,1	31,7
Raízes de Soja										
Fósforo (P ₂ O ₅)										
Controle	4,4 a	0,63 a	- ⁽³⁾	2,9 a	0,37 a	0,60 a	13,8 a	1255 a	37,4 a	52,4 a
Com P	4,2 a	0,64 a	-	2,8 a	0,35 a	0,50 a	12,7 a	1211 a	45,1 a	47,3 a
DMS	0,7	0,1	-	0,5	0,1	0,1	2,4	347,8	13,6	6,2
Condicionadores										
Controle	3,9 a	0,61 a	-	2,8 a	0,38 a	0,37 b	12,6 a	1.269 a	35,8 a	44,8 a
Gesso	4,6 a	0,62 a	-	3,0 a	0,37 a	0,65 a	13,1 a	1.287 a	44,9 a	53,0 a
CaSO ₄ .2H ₂ O	4,4 a	0,66 a	-	2,9 a	0,34 a	0,63 a	13,9 a	1.143 a	43,1 a	51,8 a
DMS	1,1	0,2	-	0,8	0,1	0,2	3,6	194,2	20,6	9,4
CV (%)	16,3	21,1	-	17,6	23,5	21,9	17,2	24,3	31,4	11,9

⁽¹⁾90 kg ha⁻¹ de P_2O_5 na forma de superfosfato triplo. ⁽²⁾Aplicação de 6,0 t ha⁻¹. ⁽³⁾Valores abaixo do limite de detecção. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

As correlações obtidas entre os nutrientes acumulados nas raízes e o CRA e a MSR de trigo e soja estão apresentadas na Tabela 5.11. Houve correlações significativas e positivas entre todos os macronutrientes e o Zn acumulados nas raízes de trigo e o CRA e a MSR. Já, para a soja, as correlações foram positivas entre quase todos os nutrientes acumulados nas raízes e o CRA e a MSR, exceto para o Mn.

Tabela 5.11 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os nutrientes acumulados nas raízes e o comprimento radicular por área e a massa seca de raízes de trigo e de soja.

Cultura	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
<i>Comprimento radicular por área (cm cm⁻²)</i>										
Trigo	0,43*	0,44*	0,46*	0,48*	0,44*	0,48*	0,34 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,43*
Soja	0,81**	0,66**	- ⁽¹⁾	0,55**	0,50**	0,70**	0,60*	0,49*	-0,19 ^{ns}	0,68**
<i>Massa seca de raízes (mg planta⁻¹)</i>										
Trigo	0,79**	0,41*	0,54*	0,64**	0,55**	0,72**	0,05 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,54**
Soja	0,93**	0,74**	- ⁽¹⁾	0,84**	0,61**	0,68**	0,79**	0,69**	-0,36 ^{ns}	0,79**

⁽¹⁾Valores abaixo do limite de detecção. ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

5.5.4 Extração de nutrientes pela parte aérea do trigo e da soja

Não houve interação significativa entre os tratamentos para a extração dos nutrientes pela parte aérea do trigo e da soja. Na Tabela 5.12 são mostrados os efeitos independentes dos tratamentos.

A adição de P proporcionou aumento nas extrações de N, P, K, Ca, Mg, Cu e Mn pela parte aérea do trigo, mas não influenciou a extração de nutrientes pela parte aérea da soja. Para o trigo, as adições de gesso e de CaSO₄.2H₂O puro proporcionaram aumentos similares nas extrações de N, K, Ca, S, Cu, Fe, Mn e Zn. Porém, observou-se que o gesso promoveu as maiores extrações de P pelo trigo, seguido do CaSO₄.2H₂O puro. Para a soja, as extrações de N, P, K, Ca, S, Cu, Fe e Mn foram maiores com a utilização do gesso e do CaSO₄.2H₂O puro, e a extração de Zn foi mais favorecida pela adição de CaSO₄.2H₂O puro, seguida do gesso agrícola (Tabela 5.12).

Tabela 5.12 – Extração de nutrientes pela parte aérea do trigo e da soja após aplicação de fósforo na semeadura e condicionadores em pré-semeadura.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----mg planta ⁻¹ -----					-----µg planta ⁻¹ -----				
Trigo										
Fósforo (P ₂ O ₅)										
Controle	39,4 b	3,0 b	78,5 b	4,9 b	3,0 b	3,7 a	20,2 b	176,4 a	137,9 b	68,7 a
Com P ⁽¹⁾	47,2 a	4,2 a	97,1 a	6,2 a	3,8 a	3,9 a	23,3 a	209,2 a	193,7 a	71,3 a
DMS	3,1	0,4	12,4	0,9	0,5	0,6	2,2	41,4	33,9	10,2
Condicionadores										
Controle	35,1 b	2,7 c	67,4 b	4,6 b	3,1 a	1,6 b	16,6 b	150,2 b	110,1 b	56,8 b
Gesso ⁽²⁾	47,9 a	4,4 a	97,8 a	5,6 a	3,3 a	4,8 a	23,4 a	205,3 a	189,7 a	76,0 a
CaSO ₄ .2H ₂ O puro ⁽²⁾	47,0 a	3,8 b	98,3 a	6,5 a	3,9 a	5,0 a	25,2 a	222,8 a	197,6 a	77,2 a
DMS	4,5	0,6	18,5	1,0	0,8	0,8	7,4	53,9	50,7	15,2
CV (%)	8,1	12,6	16,2	19,1	18,4	16,8	3,3	24,7	23,5	16,7
Soja										
Fósforo (P ₂ O ₅)										
Controle	105,0 a	6,9 a	65,4 a	20,2 a	9,5 a	5,9 a	24,6 a	326,2 a	123,2 a	86,2 a
Com P	111,9 a	7,2 a	72,3 a	21,0 a	9,9 a	6,1 a	25,3 a	348,3 a	142,5 a	90,2 a
DMS	12,8	1,0	7,6	2,8	1,9	1,1	3,7	67,5	50,8	6,8
Condicionadores										
Controle	79,6 b	5,5 b	55,5 b	16,5 b	8,2 a	3,2 b	20,8 b	271,6 b	99,7 a	64,9 c
Gesso ⁽²⁾	118,9 a	7,7 a	71,1 a	21,5 a	9,8 a	6,8 a	25,7 a	354,9 a	148,9 a	94,2 b
CaSO ₄ .2H ₂ O puro ⁽²⁾	126,9 a	7,9 a	79,9 a	23,8 a	11,1 a	8,0 a	28,5 a	395,2 a	150,0 a	105,4 a
DMS	19,0	1,5	11,4	4,2	2,9	1,6	4,8	80,6	75,9	10,2
CV (%)	13,5	16,7	12,7	15,7	22,8	20,4	15,5	23,0	43,9	8,9

⁽¹⁾90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato triplo. ⁽²⁾Aplicação de 6,0 t ha⁻¹. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

5.5.5 Número de perfilhos por planta de trigo

A interação entre os tratamentos não foi significativa para o número de perfilhos de trigo. Porém, observou-se que, independentemente dos tratamentos com gesso, a aplicação de P na semeadura aumentou o número de perfilhos. Por outro lado, a aplicação de gesso e de CaSO₄.2H₂O puro, independentemente do P, também proporcionou acréscimos no número de perfilhos de trigo (Figura 5.2).

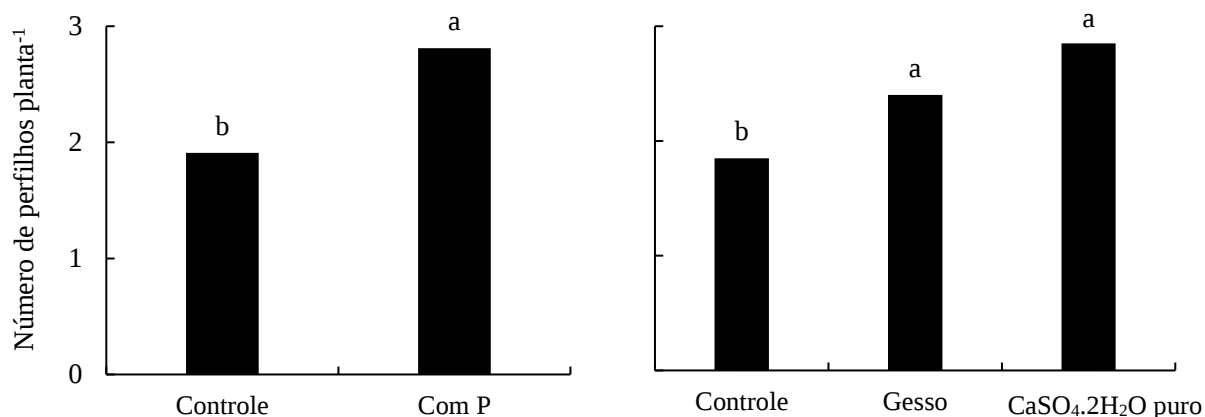


Figura 5.2 – Número de perfilhos planta⁻¹ de trigo em colunas de solo, após aplicação de fósforo (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) na semeadura e condicionadores em pré-semeadura. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

5.5.6 Produção de massa seca da parte aérea de trigo e soja

Houve interação entre os tratamentos para a produção de massa seca (MS) do trigo, enquanto que para a produção de MS da soja ocorreram efeitos independentes dos tratamentos com adição de P e gesso (Figura 5.3a,b).

Para o trigo, a adição de gesso e de CaSO₄.2H₂O puro, na ausência de P, ocasionou aumento significativo na produção de MS. Todavia, com adição de P, apenas a aplicação de CaSO₄.2H₂O puro proporcionou maior produção de MS. Na presença de P, a adição de gesso foi similar ao tratamento controle. Por outro lado, no controle sem gesso, a adição de P na semeadura ocasionou aumento significativo na produção de MS do trigo. Para o tratamento com gesso, a adição de P não influenciou a produção de MS, enquanto que para o tratamento com CaSO₄.2H₂O puro, a adição de P aumentou significativamente a produção de MS da parte aérea do trigo (Figura 5.3a).

Para a soja, independentemente dos tratamentos com gesso, a aplicação de P não interferiu na produção de MS, mas a adição de gesso e de CaSO₄.2H₂O puro proporcionou aumento significativo na produção de MS da parte aérea das plantas (Figura 5.3b).

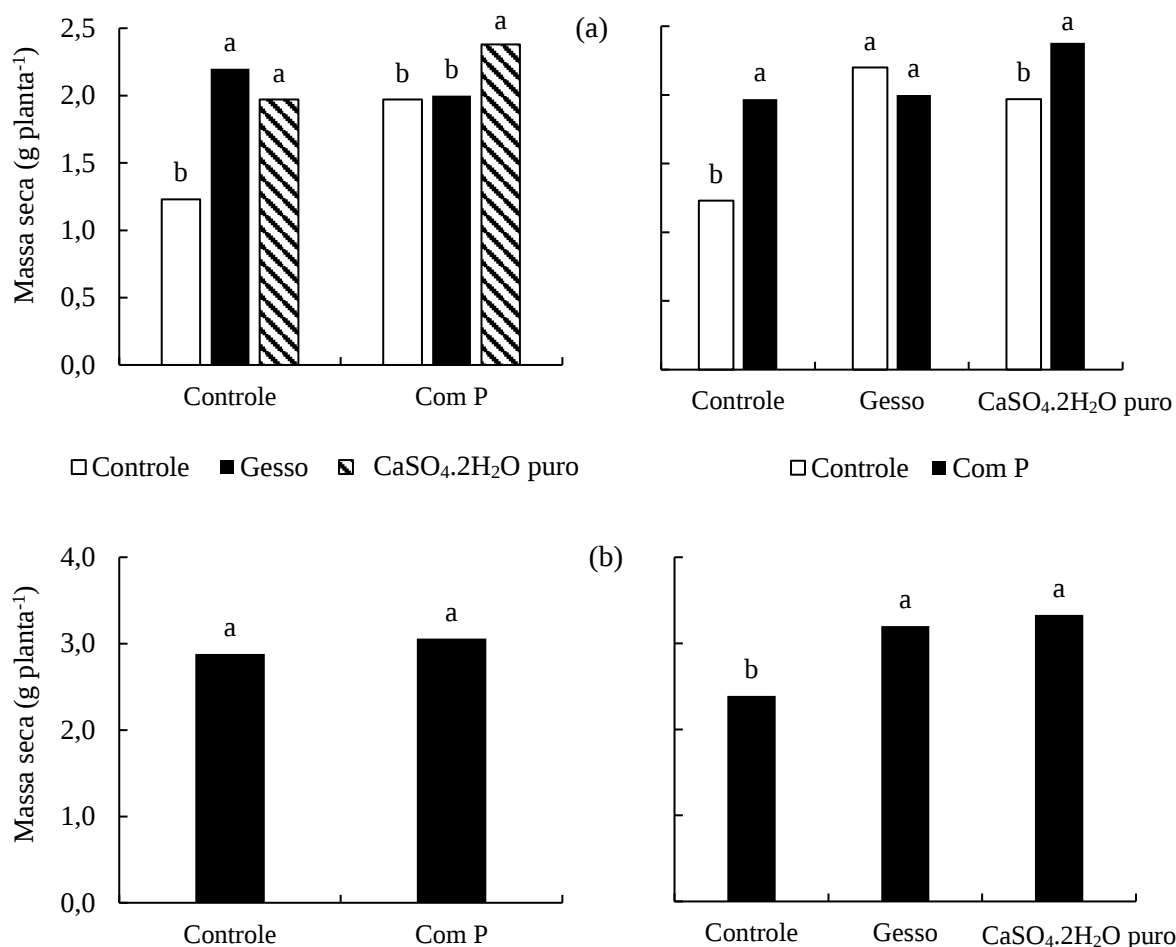


Figura 5.3 – Produção de massa seca (g planta⁻¹) da parte aérea de trigo (a) e soja (b), após aplicação de fósforo (90 kg P₂O₅ ha⁻¹) na semeadura e condicionadores em pré-semeadura. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

Na Tabela 5.13 estão apresentados os coeficientes de correlação entre a produção de MS da parte aérea e a extração dos nutrientes pelas culturas de trigo e soja. Correlações (r) significativas e positivas foram obtidas entre a produção de MS da parte aérea e todos os nutrientes extraídos (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn) pelas plantas de trigo e soja. A correlação menos expressiva ocorreu entre a produção de MS da parte aérea da soja e a extração de Mn.

Tabela 5.13 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a massa seca da parte aérea e a extração de nutrientes pelas plantas de trigo e soja.

Cultura	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
<i>Massa seca parte aérea (g planta⁻¹)</i>										
Trigo	0,92**	0,82**	0,87**	0,80**	0,78**	0,74**	0,91**	0,77**	0,76**	0,62**
Soja	0,96**	0,80**	0,93**	0,92**	0,71**	0,77**	0,71**	0,71**	0,43*	0,87**

ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

Correlações positivas foram verificadas entre a produção de MS da parte aérea de trigo e a DCR nas camadas de 10–20 e 20–30 cm. Já, para a soja, a correlação entre a produção de MS da parte aérea e a DCR ocorreu apenas na camada de 20–30 cm. Considerando-se o CRA até a profundidade de 30 cm, notam-se correlações positivas deste atributo com a MS da parte aérea de ambas as culturas (Tabela 5.14).

Tabela 5.14 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre atributos de raízes de trigo e soja e a produção de massa seca da parte aérea.

Camada ---cm---	Massa seca da parte aérea de trigo -----g planta ⁻¹ -----	Massa seca da parte aérea de soja -----g planta ⁻¹ -----
<i>Densidade de comprimento (m dm⁻³)</i>		
0–10	0,34 ^{ns}	0,18 ^{ns}
10–20	0,48*	0,57**
20–30	0,76**	0,06 ^{ns}
<i>Comprimento radicular por área (cm cm⁻²)</i>		
0–30	0,57**	0,53*

ns = não significativo. **p<0.01, *p<0.05.

5.5.7 Eficiência do uso do fósforo pelo trigo e pela soja

Na Figura 5.4a,b estão apresentados os resultados de eficiência de uso do P (EUP) pelas plantas de trigo e soja. Para o trigo, os maiores valores da EUP foram obtidos com a aplicação de CaSO₄.2H₂O puro, uma vez que o gesso não diferiu dos tratamentos controle e com CaSO₄.2H₂O puro. A utilização do CaSO₄.2H₂O puro proporcionou aumento de 30% na EUP pelas plantas de trigo, em relação ao tratamento controle (Figura 5.4a).

Para a soja, as adições de gesso e de CaSO₄.2H₂O puro proporcionaram, de forma similar, os maiores valores de EUP. Em relação ao tratamento controle, a adição de gesso e de CaSO₄.2H₂O puro ocasionaram, respectivamente, acréscimos de 79 e 82% na EUP (Figura 5.4b).

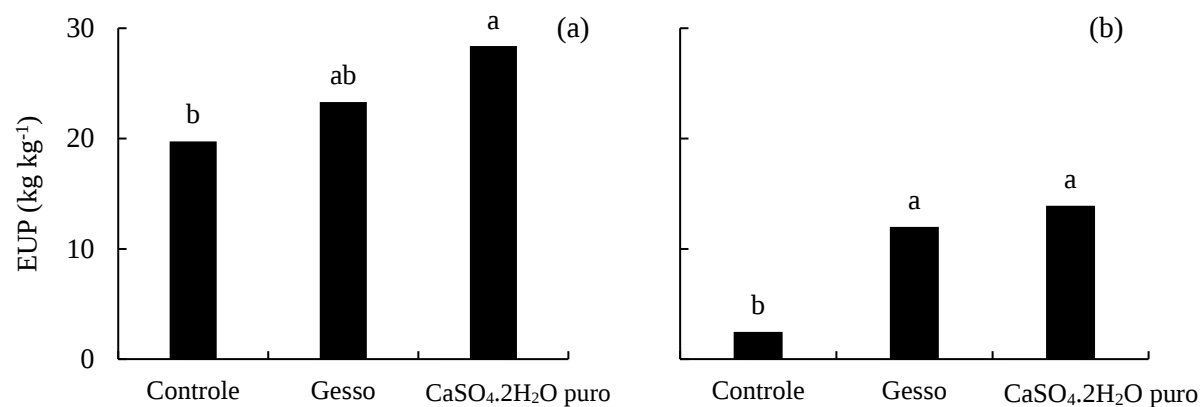


Figura 5.4 – Eficiência do uso do fósforo (EUP) pelas plantas de trigo (a) e soja (b), afetados pela aplicação de gesso e de CaSO₄.2H₂O puro. Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p=0,05).

5.6 DISCUSSÃO

5.6.1 Alterações nos atributos químicos dos solos

De maneira geral, os tratamentos influenciaram os teores de P, Ca e SO_4^{2-} em ambos os experimentos, e os teores de Mg^{2+} , a relação Ca:Mg e a m% no solo amostrado após o cultivo da soja. Os aumentos nos teores de P na camada superficial do solo observados nesse estudo, em função da adubação fosfatada e da aplicação de gesso (Tabelas 5.2 e 5.3) eram esperados, sendo também frequentemente reportados na literatura (CORRÊA et al., 2004; CAIRES et al., 2003; 2011a,b, MACHADO et al., 2011, 2012). Salienta-se que o expressivo aumento de P no solo com a adição de gesso agrícola certamente foi decorrente da alta concentração de P_2O_5 encontrada como impureza na sua composição. No presente estudo, aplicando-se 6 t ha^{-1} de gesso, houve um fornecimento de 102 kg ha^{-1} de P_2O_5 ao solo, sendo, inclusive, semelhante à dose utilizada do superfosfato triplo na semeadura ($90 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

O gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro aumentaram os teores de Ca trocável apenas na camada superficial do solo (0–10 cm), enquanto o SO_4^{2-} foi aumentado até 20 cm no solo após trigo, e até 30 cm no solo após soja (Tabelas 5.2 e 5.3). Tais efeitos podem estar relacionados com o movimento mais rápido de SO_4^{2-} em relação ao Ca^{2+} , em solos com predominância de carga líquida negativa (CAIRES et al., 2003), e também ao curto prazo do experimento. Além disso, foi observada lixiviação de Mg^{2+} com a aplicação de gesso no solo após soja. Carvalho & Raij (1997), avaliando os efeitos do $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro e do gesso agrícola na composição química do subsolo (camada de 5–100 cm) também observaram efeitos semelhantes desses condicionadores no aumento dos teores de Ca^{2+} e SO_4^{2-} no solo. Caires et al (2003; 2011a,b), Costa & Crusciol (2016), Rampim et al. (2013) e Zandoná et al. (2015) também observaram aumentos nos teores de Ca^{2+} e SO_4^{2-} , com consequente lixiviação do Mg^{2+} , devido ao uso de gesso agrícola. Esses efeitos, de maneira geral, têm sido atribuídos ao aumento da concentração de Ca^{2+} no solo ocasionado pela aplicação de gesso, o que favorece o deslocamento do Mg^{2+} dos sítios de troca, podendo este cátion formar par iônico com o SO_4^{2-} , e se movimentar pelo perfil (ZAMBROSI et al., 2007). Essa afirmação pode ser confirmada pelo aumento da relação Ca:Mg em função da aplicação de gesso e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro, observada na camada superficial do solo (0–10 cm) em ambos os experimentos (Tabelas 5.2 e 5.3). Além disso, no solo após soja, houve significativa redução na m%, certamente em consequência da elevação do Ca^{2+} proveniente do gesso e do $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro.

5.6.2 Alterações nas raízes

O P é o nutriente mais influencia o crescimento radicular (MANSCHADI et al., 2014). Nesse trabalho, observaram-se maiores respostas das raízes de trigo ao fornecimento de P (independentemente do gesso) em relação à soja. Para o trigo, os benefícios do fornecimento do P foram notados nas raízes amostradas em todas as camadas, enquanto que para a soja, apenas na camada mais profunda (20–30 cm), e também quando se considerou o comprimento total (0–30 cm). A absorção de P da solução do solo que entra em contato com a superfície das raízes é determinada pela extensão do sistema radicular, a concentração de P na superfície da raiz e também pela eficiência genética das plantas em capturar o P (LYNCH & BROWN, 2008). As plantas emitem sinais na presença do P para estimular o crescimento radicular e absorver o nutriente (LYNCH & BROWN, 2008). Tem sido observado que raízes de monocotiledôneas são mais eficientes na absorção do P, quando comparadas às dicotiledôneas (MANSCHADI et al., 2013). Talvez por esse motivo, as raízes de trigo tenham demonstrado maiores respostas à presença de P no solo, sendo, inclusive, a única a apresentar correlações entre os atributos radiculares e os teores de P no solo (Tabela 5.9). Vale ressaltar que o trigo apresentou comprimento radicular total por área 79% superior ao da soja (Figura 5.1). Todavia, a média de densidade de raízes de trigo foi bem maior na camada mais superficial do solo, provavelmente estimulada pela presença do P aplicado. A distribuição radicular para o trigo foi de 59% na camada de 0–10 cm, 18% na camada de 10–20 cm e 23% na camada de 20–30 cm (Tabela 5.8). Já para a soja, a distribuição de raízes se apresentou mais homogênea entre as camadas, sendo de 39%, 32% e 30%, nas respectivas profundidades de 0–10, 10–20 e 20–30 cm (Tabela 5.8). Embora as raízes de trigo sejam mais eficientes na captura do P, a soja apresenta menor nível crítico de P no solo, quando comparada ao trigo (VIEIRA et al., 2015). Rosolem & Marcello (1998) demonstraram que 8,0 mg dm⁻³ de P no solo seria suficiente para o crescimento radicular de soja. Nesse trabalho, as concentrações de P dos solos coletados para os experimentos com trigo e soja foram de 9,9 e 11,0 mg dm⁻³ na camada de 0–20 cm, respectivamente.

Por outro lado, os efeitos positivos da aplicação de gesso e de CaSO₄.2H₂O puro (independentemente do P) foram observados tanto para raízes de trigo como de soja. Para o trigo, isso pode ser atribuído ao fornecimento de Ca²⁺ proveniente desses insumos, uma vez que houve correlações positivas do elemento entre o comprimento radicular e a massa seca de raízes do trigo. Para a soja, isso pode estar mais relacionado com o fornecimento do SO₄²⁻ que do Ca²⁺, tendo em vista as correlações entre esses elementos e os atributos radiculares da soja

(Tabela 5.9). Além disso, o CRA da soja apresentou correlação positiva com o Mg^{2+} . Leguminosas têm maior necessidade de SO_4^{2-} e Mg^{2+} do que gramíneas, pois apresentam maiores teores de proteínas nos grãos. O S está diretamente ligado à formação de proteínas nos grãos, sendo constituinte de aminoácidos como a cistina e a metionina. O Mg, além de ser a chave principal para a formação da molécula de clorofila, também apresenta funções na síntese das proteínas (agregação de ribossomos) e, ainda, atua como catalisador na reação de fosforilação do ATP – energia requerida em grande quantidade por plantas fixadoras de N_2 (COOPER & SCHERER, 2012; HAWKESFORD et al., 2012).

O Ca é particularmente importante para o crescimento radicular das plantas, pois está diretamente ligado à divisão celular e ao crescimento meristemático das células da raiz. Porém, as raízes de soja parecem necessitar de pouca quantidade de Ca para o seu desenvolvimento, uma vez que não foram observadas maiores restrições no crescimento radicular em solos com teores de Ca de $8,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (ROSOLEM & MARCELLO, 1998). Isso também pode estar ligado ao fato de que a maior necessidade do Ca para as leguminosas está na nodulação e, uma vez formados os nódulos, as leguminosas podem crescer em concentrações relativamente baixas desse nutriente (MALAVOLTA et al., 1997).

Considerando o comprimento radicular por área das plantas, notou-se que, na ausência de P, o gesso se sobressaiu ao $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ puro (Figura 5). Isso pode estar ligado ao fato de o gesso possuir P em sua composição, beneficiando, desta forma, o desenvolvimento das raízes com o fornecimento deste nutriente na forma de impureza. Salienta-se que a aplicação de 6 t ha^{-1} de gesso forneceu cerca de 102 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Todavia, a aplicação conjunta de 6 t ha^{-1} de gesso e $90 \text{ kg P}_2O_5 \text{ ha}^{-1}$, não trouxe benefícios ao crescimento radicular, principalmente para as plantas de trigo. Para a soja, efeitos negativos da aplicação do P em conjunto com o gesso para os atributos radiculares foram evidenciados somente na camada mais profunda (20–30 cm). Carvalho & Raij (1997) não observaram diferenças entre a aplicação de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ puro e de gesso agrícola sobre a densidade de comprimento de raízes de milho. Porém, vale destacar que o gesso agrícola utilizado pelos autores apresentou apenas 3 g kg^{-1} de P em sua composição. Pode-se inferir, portanto, que os efeitos negativos da aplicação conjunta de fertilizante fosfatado acidulado e gesso foi devido ao excesso de P aplicado com esses insumos. Isso ficou bastante claro para o trigo, pois quando se adicionou o $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ puro juntamente com $90 \text{ kg P}_2O_5 \text{ ha}^{-1}$, observaram-se efeitos positivos desse tratamento sobre os atributos radiculares (Tabelas 5.5, 5.6 e 5.8). Diversos autores têm reportado que altas doses de P, em ambiente que já possui concentrações de média a alta de P no solo, pode ser prejudicial para as raízes (FAGERIA & MOREIRA, 2011; GRANT et al.,

2005). Os autores não têm um consenso bem estabelecido sobre os motivos para tal fato. Todavia, eles reportam que pode ser devido à inibição do crescimento de micorrizas, e também pelo fato de a raiz não precisar explorar maiores porções do solo para interceptar o P, economizando, assim, o custo de C da biomassa da planta (GRANT et al., 2005; RICHARDSON et al., 2011). Além disso, houve fornecimento expressivo de Ca no solo com a aplicação conjunta do fertilizante fosfatado com o gesso e com o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro. Logo, o excesso de Ca também pode ser prejudicial à microbiota do solo (LOPES, 1998). Porém, se o Ca fosse o maior problema, reduções no desenvolvimento radicular com a aplicação do P juntamente com $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro também teriam ocorrido. Outros autores relatam que altas doses de P poderiam causar inibição da absorção de Zn (ARAÚDO & MACHADO, 2006; ZHANG et al., 2015), o que prejudicaria o desenvolvimento das plantas. Entretanto, no presente trabalho não foram observadas maiores alterações no Zn devido à aplicação de P.

Diversos fatores podem influenciar a absorção dos nutrientes pelas raízes, entre eles a capacidade de exploração do sistema radicular, as condições edafoclimáticas, as propriedades dos solos e a disponibilidade de água. A adubação fosfatada favoreceu o acúmulo de N, P, K e Mg nas raízes de trigo, mas não influenciou o acúmulo de nutrientes nas raízes de soja, possivelmente devido ao maior comprimento radicular do trigo que favoreceu a captura desses nutrientes. O acúmulo de nutrientes nas raízes (principalmente de macronutrientes) esteve diretamente relacionado com o comprimento radicular e com a produção de MSR de trigo e soja (Tabela 5.11). O gesso favoreceu o acúmulo de P e K nas raízes de trigo, provavelmente pelo fato de ter promovido, de maneira independente, melhoria no desenvolvimento radicular da cultura, facilitando a interceptação desses elementos que se movimentam por difusão na solução do solo. Nas raízes de soja, o acúmulo de S foi influenciado pela aplicação de gesso e de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro certamente pelo alto conteúdo de SO_4^{2-} fornecido ao solo pelos condicionadores, e também pelo fato da soja ser uma cultura leguminosa que necessita de maiores quantidades de S para formação das proteínas (HAWKESFORD et al., 2012). Além disso, a soja foi mais eficiente que o trigo na translocação do S para a parte aérea, pois a quantidade média de S acumulada nas raízes de soja foi cerca de 5% inferior à do trigo (Tabela 5.10), mas a concentração do nutriente na parte aérea da leguminosa foi 37% maior (Tabela 5.12). Silva et al. (2003), estudando a translocação e redistribuição de ^{35}S (radioisótopo), verificaram que o milho, apesar de ter apresentado maior absorção radicular, reteve grande parte do S na raiz, enquanto a soja absorveu consideravelmente menos, porém apresentou maior eficiência de translocação de S.

5.6.3 Alterações na parte aérea do trigo e da soja

A adubação fosfatada (independentemente do gesso) influenciou as extrações de N, P, K, Ca, Mg, Cu e Mn pelas plantas de trigo, mas não influenciou a extração de nutrientes pelas plantas de soja (Tabela 5.12). Logo, esses resultados estão interligados com a produção de MS das culturas (Tabela 5.13), pois a aplicação de P influenciou somente a produção de massa seca (MS) de parte aérea do trigo (Figura 5.3). Salienta-se que o número de perfilhos de trigo também foi maior com a adubação fosfatada (Figura 5.2), o que certamente influenciou a produção de MS da cultura. O P tem funções importantes na fase inicial de desenvolvimento de gramíneas. No estágio inicial, há intensa atividade meristemática em virtude do desenvolvimento do sistema radicular, do perfilhamento e da emissão de estolões. Assim, a presença do P é essencial nessa fase, pois além de fornecer energia na forma de ATP, participa da divisão celular, sendo fundamental na estrutura dos ácidos nucléicos (WIETHÖLTER, 2011). As maiores respostas do trigo à adubação fosfatada também se devem ao fato dessa cultura apresentar maior nível crítico de P no solo (9 mg dm^{-3}) quando comparado ao da soja ($6,2 \text{ mg dm}^{-3}$) (VIEIRA et al., 2015).

Por outro lado, o gesso e o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro influenciaram as extrações de todos os nutrientes, exceto Mg, em ambas as culturas (Tabela 5.12). Esses resultados provavelmente foram reflexos dos efeitos dos tratamentos na produção de MS de trigo e soja (Figura 5.3). Destaca-se que correlações positivas e significativas foram observadas entre a produção de MS das culturas e a extração de todos os nutrientes (Tabela 5.13). Isso significa que há maior absorção de nutrientes com o aumento na produção de MS da parte aérea das culturas. Carvalho & Raij (1997) também observaram efeitos semelhantes entre o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro e o gesso agrícola na absorção de N, P, K, Ca, Mg e S por plantas de milho.

Salienta-se que, efeitos negativos da aplicação do gesso agrícola em conjunto com o fertilizante fosfatado refletiu na redução da produção de MS, somente para o trigo (Figura 5.3). Isso está relacionado ao fato desses tratamentos terem influenciado o crescimento radicular, comprovado pelas correlações positivas entre a MS da parte aérea do trigo e a DCR em todas as camadas de solo (Tabela 5.14). Para a soja, os efeitos negativos desses tratamentos foram observados apenas para as raízes da camada mais profunda (20–30 cm) e, talvez por isso, não refletiram de igual forma na produção de MS dessa cultura. Além disso, observaram-se correlações positivas entre a produção de MS da parte aérea e o CRA até 30 cm, tanto para o trigo quanto para a soja (Tabela 5.14). Isso significa que o desempenho do

sistema radicular das plantas de trigo e soja refletem na produção de MS da parte aérea das culturas.

A EUP das plantas de trigo foi, em média, 58% superior em relação à soja (Figura 5.4), corroborando com o Lynch & Brown (2008), Manschadi et al. (2013; 2014) e Richardson (2011), os quais relatam que gramíneas apresentam maior EUP do que leguminosas. Porém, para o trigo, o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro proporcionou a maior eficiência, uma vez que o gesso não diferiu dos tratamentos. Para a soja, tanto o gesso quanto o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro proporcionaram maior EUP. Esses resultados demonstram que o P presente na forma de impureza na constituição do gesso agrícola pode influenciar o desenvolvimento das plantas, principalmente de trigo. Neste caso, se o solo já possuir altos teores de P e o gesso possuir altos teores de P_2O_5 em sua composição, é importante prestar atenção às doses de fertilizante fosfatado a serem aplicadas na semeadura, para que não haja efeitos negativos do excesso de P no desenvolvimento das plantas.

5.7 CONCLUSÕES

1. O gesso agrícola utilizado de maneira independente ao fósforo na semeadura promove maior crescimento radicular de trigo quando comparado ao $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro. Para a soja, os efeitos do gesso agrícola e do $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ puro são semelhantes.

2. A utilização de dose excessiva de gesso agrícola em conjunto com alta dose de fósforo na semeadura prejudica o crescimento radicular e a produção de matéria seca da parte aérea, principalmente de plantas de trigo.

3. O fósforo presente como impureza na composição do gesso agrícola influencia o desempenho produtivo das plantas, em especial para a cultura do trigo.

5.8 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p.253-280.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. **Mercado de fertilizantes: Janeiro a julho de 2016**. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/estatistica/comentarios.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2016.

BROGGI, F.; OLIVEIRA, A. L. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G.; NASCIMENTO, C. W. A. Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation time. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.32-38, 2010.

CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas no solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.275-286, 2003.

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

CAIRES, E. F.; CORRÊA, J. C. L.; CHURKA, S.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. **Scientia Agrícola**, v.63, p.502-509, 2006b.

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

CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.161-169, 2000.

CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; FELDHAUS, I. C. BLUM, J. crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.1029-1040, 2001.

CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.315-327, 1999.

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

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

CAIRES, E. F.; ZARDO FILHO, R.; BARTH, G.; JORIS, H. A. W. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO₃-N in Subsoil. **Pedosphere**, v.26, p.474-485, 2016.

COOPER, J.; SCHERER, H. Nitrogen Fixation, In: MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. San Diego: Elsevier, 2012. p.389-408.

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.1231-1237, 2004.

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

COSTA, H. M. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v.74, P.119-132, 2016.

CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F.; DALMAGO, G. A.; CAIERÃO, E.; PASINATO, A. Trigo. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos**. Brasília: INMET, 2009. p.279-294.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353p.

FAGERIA, N. K. **The role of plant roots in crop production**. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2013. 451p.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plantas. **Advances in Agronomy**, v.110, p.251-331, 2011.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos**. Brasília: INMET, 2009. p.261-278.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, p.109-112, 2014.

GRANT, C.; BITTMAN, S.; MONTREAL, M.; PLENCHETT, C.; MOREL, C. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. **Canadian Journal of Plant Science**, p.3-14, 2005.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; MOLLER, I. S.; WHITE, P. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. San Diego: Elsevier, 2012. p.135-190.

IBM®. **Software SPSS Statistics Base versão 22.0**. 2013. Disponível em: <<http://www-03.ibm.com/software/products/pt/spss-stats-base>>. Acesso em: 05 ago. 2016.

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

LOPES, A. S. **Manual internacional da fertilidade do solo**. 2.ed. Piracicaba: POTAFÓS, 1998. 177p.

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Root strategies for phosphorus acquisition. In: WHITE, P. J.; HAMMOND, J. P. (Eds.). **The ecophysiology of plant-phosphorus interactions**. Heidelberg: Springer, 2008. p.83-116.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. **Bioscience Journal**, v.28, p.1-7, 2012.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Bioscience Journal**, v.27, p.70-76, 2011.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Potafós, 1997. 319p.

MANSCHADI, A. M.; KAUL, H. P.; VOLLMANN, J.; EITZINGER, J.; WENZEL, W. Developing phosphorus-efficient crop varieties: An interdisciplinary research framework. **Field Crops Research**, Article in Press, 2014.

MANSCHADI, A. M.; MANSKE, G. G. B.; VLEK, P. L. G. Root architecture and resource acquisition: Wheat as a model plant. In: ESCHER, A.; BEECKMAN, T. (Eds.). **Plant roots the hidden half**. 4.ed. USA: CRC Press. 2013. p.22.1-22.18.

MORAES, M. F.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; COSCIONE, A. R. Mobilidade de íons em solo ácido com aplicação de calcário, ácido orgânico e material vegetal em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.673-684, 2007.

RAMPIM, L.; BORSOI, A.; MOLIN, P. V. D.; SARTO, M. V. M.; ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; LIMA, P. R.; GUIMARÃES, V. F.; OHLAND, T.; KLEIN, J. Foliar tissue, grain yield and economic return by surface application of gypsum and diferente number of soybean plants in precision seed drill. **African Journal of Agricultural Research**, 10, 1636-1646, 2015.

RAMPIM, L.; LANA, M. C. Ion mobility and base saturation after gypsum application in continuous soybean-wheat cropping system under no-till. **Australian Journal of Crop Science**, v.9, p.468-476, 2015.

RAMPIM, L.; LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em Latossolo Vermelho submetido ao gesso cultivado com trigo e soja. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, p.1623-1638, 2013.

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

RICHARDSON, A. E.; LYNCH, J. P.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; SMITH, F. A.; SMITH, S. E.; HARVEY, P. R.; RYAN, M. H.; VENEKLAAS, E. J.; LAMBERS, H.; OBERSON, A.; CULVENOR, R. A.; SIMPSON, R. J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant and Soil**, v.349, p.121-156, 2011.

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

ROSOLEM, C. A.; MARCELLO, C. S. Crescimento radicular e nutrição mineral da soja em função da calagem e adubação fosfatada. **Scientia Agricola**, v.55, p.448-455, 1998.

SAAB, A. A.; PAULA, R. A. O mercado de fertilizantes no Brasil: Diagnósticos e propostas de políticas. **Revista de Política Agrícola**, v.17, p.5-24, 2008.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, p.576-586, 2008.

SILVA, D. J.; VENEGAS, V. H.; RUIZ, H. A.; SANT'ANNA, R. Translocação e redistribuição de enxofre em plantas de milho e de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.715-721, 2003.

SUMNER, M. E.; SHAHANDEH, H.; BOUTON, J.; HAMMEL, J. Amelioration of an acid soil prolife through deep liming an surface application of gypsum. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1254-1278, 1986.

VIEIRA, R. C. B.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; MORAES, P.; CARNIEL, E. Adubação fosfatada para alta produtividade de soja, milho e cereais de inverno cultivados em rotação em Latossolos em plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p.794-808, 2015.

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

WIETHÖLTER, S. Fertilidade do solo e a cultura do trigo no Brasil. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, C. R. **Trigo no Brasil**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2011. p.135-184.

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

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.45, p.128-137, 2015.

ZHANG, W.; LIU, D.; LI, C.; CUI, A.; CHEN, X.; RUSSELL, Y. Zinc accumulation and remobilization in winter wheat as affected by phosphorus application. **Field Crops Research**, Article in press, 2015.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo racional dos recursos naturais não renováveis, a exemplo das rochas fosfatadas, é uma responsabilidade de administração da agricultura. O desenvolvimento e a implementação de práticas que aumentem a eficiência do uso de fósforo são necessários não só por razões econômicas e ambientais em curto prazo, mas também pela importância em se levar em consideração o esgotamento desses recursos para futuras gerações.

Nesse trabalho foi possível observar que o gesso agrícola, quando utilizado de maneira racional, auxilia no aumento da eficiência e na economia da adubação fosfatada das culturas de trigo e soja. Os resultados encontrados no presente estudo conseguiram, em parte, responder os questionamentos iniciais da proposta desta pesquisa. Porém, estudos sequenciais são necessários para esclarecer e complementar os fatos aqui encontrados. Estudos esses, por exemplo, que englobem a eficiência da adubação fosfatada influenciada pela aplicação de gesso agrícola em solos com baixos teores de fósforo, pois as conclusões aqui apresentadas foram obtidas para solos contendo níveis altos de fósforo no solo.

Cabe salientar também que várias deduções apresentadas na discussão devem ser aperfeiçoadas e melhor investigadas, a exemplo da hipótese de formação de fosfatos de cálcio com a utilização de doses mais elevadas de gesso agrícola em conjunto com altas doses de fósforo na semeadura. Por isso, sugere-se a realização de análises de especiação iônica, e também, o fracionamento de fósforo nas amostras de solo coletadas, devido à importância em se compreender as reações químicas e a atividade dos íons em solução, e também para podermos elucidar tal hipótese com argumentos mais concretos.

Destaca-se ainda que seria importante avaliar os efeitos dos tratamentos para outras culturas anuais de interesse econômico, a exemplo do milho, arroz, cevada, feijão e canola, em diferentes ambientes de produção. Além disso, maior atenção deve ser dada aos resíduos advindos da industrialização do gesso agrícola. Neste estudo, ficou evidente a influência de teores relativamente altos de P_2O_5 contido no gesso no desenvolvimento das culturas de trigo e soja. Por isso, estudos similares com a utilização de gesso contendo teores mais baixos de P_2O_5 em sua composição, em solos com variados teores de P, também seriam importantes para obter melhor compreensão de futuras recomendações de gesso com o objetivo de aumentar a eficiência da adubação fosfatada.