

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

Roque Junior Sartori Bellinaso

**FORMAS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO SOB CALAGEM
INCORPORADA E SUPERFICIAL: EFEITO NA ACIDEZ,
DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E RESPOSTA DE CULTURAS**

Santa Maria, RS
2019

Roque Junior Sartori Bellinaso

**FORMAS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO SOB CALAGEM
INCORPORADA E SUPERFICIAL: EFEITO NA ACIDEZ,
DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E RESPOSTA DE CULTURAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos

Santa Maria, RS
2019

Bellinaso, Roque Junior Sartori
FORMAS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO SOB CALAGEM INCORPORADA
E SUPERFICIAL: EFEITO NA ACIDEZ, DISPONIBILIDADE DE
NUTRIENTES E RESPOSTA DE CULTURAS / Roque Junior Sartori
Bellinaso.- 2019.
99 p.; 30 cm

Orientador: Danilo dos Santos Rheinheimer
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2019

1.: Glycine max 2. Acidez do solo 3. Modo de
aplicação de fósforo I. Rheinheimer, Danilo dos Santos
II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Roque Junior Sartori Bellinaso. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: roquejunior_bellinaso@hotmail.com

Roque Junior Sartori Bellinaso

**FORMAS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO SOB CALAGEM INCORPORADA
E SUPERFICIAL: EFEITO NA ACIDEZ, DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E
RESPOSTA DE CULTURAS**



Ministério da Educação
Universidade Federal de Santa Maria
Coordenação do Programa/Curso de PG Mestrado em Ciência do Solo

ATA DE DEFESA - PROCESSO Nº 23081.007427/2019-08

Aos oito dias do mês de Março do ano de dois mil e dezenove, às treze horas, no NESAF realizou-se a prova de Defesa de Dissertação, intitulada LOCALIZAÇÃO DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO SOB CALAGEM INCORPORADA E SUPERFICIAL: RESPOSTA PRODUTIVA E NO SISTEMA RADICULAR DA SOJA, de autoria do(a) Candidato(a) ROQUE JUNIOR SARTORI BELLINASSO (201760905), aluno(a) do Programa de PG Mestrado em Ciência do Solo, em nível de Mestrado. A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS Presidente, LETÍCIA MORO e TALES TIECHER. Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi APROVADO pela Comissão Examinadora. Foi concedido um prazo de 30 dias, para o(a) candidato(a) efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. E, para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão.


TALES TIECHER


LETÍCIA MORO



DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS

- (X) Por sugestão da Comissão Examinadora, o novo título passa a ser:
FORMAS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO SOB CALAGEM INCORPORADA E SUPERFICIAL:
EFEITO NA ACIDEZ, DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E RESPOSTA DE CULTURAS.
() Declaração:

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

A meu pai, Roque Severino Bellinaso que partiu precocemente deixando eterna saudade para nossa família. Que recebas, onde estejas, minha gratidão pela incansável dedicação à família.

A minha mãe, Vania Sartori Bellinaso, que enfrentou momentos de profunda dificuldade na sua vida com muita fibra, dando força aos filhos e sustentando a família. Passastes um ano dentro de um hospital, cuidando de nosso pai, com muitas dificuldades, mesmo assim dando força e estímulo aos estudos de seus filhos. Orgulho-me de ti e da sua história de vida. Nada seria possível sem sua incansável ajuda e dedicação nas adversidades que passamos juntos.

“Eu sei que o meu Redentor vive, e que por fim se levantará sobre a terra. E ainda que a minha carne seja consumida nos meus ossos, verei a Deus.

Jó 19:25,26

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e da saúde, sendo meu esteio nos momentos de adversidades e conquistas.

A Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de conhecimento e formação na graduação em Agronomia e Mestrado em ciência do solo, ao qual passei por 8 anos.

A coordenação e secretaria do curso de pós-graduação em ciência do solo, em especial ao Everton e professor Leandro.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de Mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de auxílio financeiro para o desenvolvimento dessa dissertação, por meio do Projeto Universal.

Aos professores da pós-graduação, ao qual tive oportunidade de conviver e aprender.

Aos professores João Kaminski e Gustavo Brunetto que trabalhei durante toda a graduação como bolsista de iniciação científica, onde tive oportunidade de aprender.

Ao professor Tales Tiecher, pela amizade, pela aceitação de participação de banca e a profunda contribuição neste trabalho.

A Letícia Moro, pela amizade, pela aceitação de participação de banca, pelos conselhos e a grande colaboração para que este trabalho fosse realizado.

As minhas colegas de pós-graduação Vanessa dos Santos Dias e Jocelina Paranhos pela incansável ajuda nos momentos de maior dificuldade, bem como de intenso trabalho de coleta de dados, estando sempre solícitas e dispostas a ajudar.

A Graciele Fernandes que me ajudou em diversos momentos.

A todos colegas de pós-graduação em ciência do solo, do laboratório de química e fertilidade do solo, ajudando e dando bons conselhos no decorrer da elaboração deste trabalho, em especial, Gilmar, Carina, Adrielle, Isley Cristiellem, André, Lincon, Gerson e Betânia.

Ao bolsista Pedro Bolzan pela grande ajuda, estando sempre solícito a ajudar o grupo.

Ao bolsista Marcelo, que contribuiu muito na realização de análises e manutenção dos experimentos.

Aos bolsistas Robson e Marcieli que contribuíram, com esforço e dedicação, na elaboração deste trabalho.

A todos os bolsistas que passaram pelo laboratório de química e fertilidade do solo.

A Raissa, que me ajudou em diversos momentos para realização de análises de raízes.

A técnica de laboratório Elci Gubiani pela amizade, apoio e dedicação, sendo sempre solícita na realização das análises laboratoriais.

Aos servidores do galpão de solos Alex e Paulo, pela amizade e grande ajuda nas atividades realizadas.

*Deus escolheu as coisas loucas deste mundo para confundir as sábias;
Escolheu as coisas fracas deste mundo para confundir as fortes;
Escolheu as coisas vis e desprezíveis, e as que não são, para aniquilar as que são;
Para que nenhuma carne se glorie perante ele.*

1 Coríntios 1:27-29

RESUMO

FORMAS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO SOB CALAGEM INCORPORADA E SUPERFICIAL: EFEITO NA ACIDEZ, DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E RESPOSTA DE CULTURAS

AUTOR: Roque Junior Sartori Bellinaso

ORIENTADOR: Danilo Rheinheimer dos Santos

A soja (*Glycine max*) é cultivada em grande parte das terras agricultáveis do Brasil, predominantemente sob o sistema de plantio direto (SPD), onde a prática de aplicação de fertilizantes e calcário na superfície do solo tem aumentado. Este manejo e adubação e correção da acidez do solo pode levar redução do potencial produtivo da soja. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento produtivo e o sistema radicular da soja quando cultivada sob diferentes modos de aplicação de fósforo (P) e calcário, bem como avaliar a alteração dos atributos químicos do solo causados pelos tratamentos. Neste trabalho realizou-se a aplicação de P incorporado ao solo, na linha de semeadura, em superfície e sem P, sob a condição de calagem superficial e incorporada ao solo. Foram avaliados: produtividade da soja, Massa Seca de aveia e trigo, concentração de nutrientes (N, Ca, Mg, P) no tecido da soja, distribuição e comprimento do sistema radicular, e a alteração dos atributos químicos (teor de P, K, Ca, Mg, pH, acidez potencial) no perfil do solo. A incorporação de calcário proporcionou melhores resultados de correção da acidez do solo em subsuperfície, bem como melhor distribuição de Ca e Mg no perfil do solo, proporcionando maior produtividade da soja. A aplicação de P incorporada ao solo e na linha de semeadura, com incorporação de calcário, proporcionou a maior produtividade da soja, bem como maiores teores de P e Mg no tecido da soja. Houve estímulo ao crescimento radicular da soja nas regiões do solo com maior teor de P. O P e o calcário contribuem positivamente para o crescimento da soja, especialmente quando localizados em regiões próximas à raiz.

Palavras-chave: *Glycine max*, acidez do solo, modo de aplicação de fósforo.

ABSTRACT

FORMS OF APPLICATION OF PHOSPHORUS UNDER INCORPORATED AND SURFACE CALENDER: EFFECT ON ACIDITY, NUTRIENT AVAILABILITY AND CULTURE RESPONSE

Author: Roque Junior Sartori Bellinaso

Advisor: Danilo Rheinheimer dos Santos

Soybean (*Glycine max*) is grown in a large part of Brazil's arable land, predominantly under no-tillage system (SPD), where the application of fertilizers and limestone to the soil surface has increased. This management and fertilization and correction of the soil acidity can lead to a reduction of the productive potential of the soybean. The objective of this work was to evaluate the productive behavior and the root system of the soybean when cultivated under different modes of application of phosphorus (P) and limestone, as well as to evaluate the alteration of soil chemical attributes caused by the treatments. In this work the application of P incorporated to the soil in the sowing line on the surface and without P under the condition of surface liming and incorporated into the soil was carried out. The following parameters were evaluated: soybean yield, oat and wheat dry matter, nutrient concentration (N, Ca, Mg, P) in the soybean tissue, distribution and length of the root system, and changes in chemical attributes (P, K, Ca, Mg, pH, potential acidity) in the soil profile. The incorporation of limestone provided better soil acidity correction in subsurface, as well as a better distribution of Ca and Mg in the soil profile, providing higher soybean yield. The application of P incorporated into the soil and in the sowing line, with limestone incorporation, provided the highest yield of soybean, as well as higher levels of P and Mg in the soybean tissue. There was a stimulus to root growth of soybean in soil regions with higher P content. P and limestone contribute positively to soybean growth, especially when located in regions close to the root.

Key words: *Glycine max*, soil acidity, mode of phosphorus application.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Relação entre o pH da solução do solo e a proporção de H_2PO_4^- (linha tracejada) em solução, e a absorção de fosfato (linha sólida) e sulfato (linha pontilhada) por plantas de feijão. Os dados se apresentam com valores relativos (HENDRIX, 1967 apud MARCSHNER, 2017, pg. 22).	25
Figura 2 - Disposição espacial do teor de P no solo com aplicação de P na superfície do solo.	32
Figura 3- Disposição espacial do teor de P no solo com aplicação de P na linha de semeadura.	33
Figura 4 - Teores de P no solo em diferentes profundidades, com aplicação na linha de semeadura e na superfície do solo. Testemunha (Linha preenchida), sulco (Linha pontilhada espessa) ea lanço (Linha pontilhada estreita).	34
Figura 5– Localização experimento no assentamento Alvorada, Júlio de Castilhos – RS	35
Figura 6– Localização experimento no assentamento Alvorada, Júlio de Castilhos – RS	36
Figura 7 - Normais climatológicas da cidade de Júlio de Castilhos	36
Figura 8 – pH no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e pH do solo conforme o modo de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).....	46
Figura 9 – Saturação por alumínio no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).....	46
Figura 10 – Acidez potencial ($\text{H}^+\text{+Al}$) no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).....	47
Figura 11 - Saturação por bases no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).....	50
Figura 12 – Teor de Ca trocável no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).....	50

Figura 13 – Teor de Mg trocável no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).....	51
Figura 14 – Teor de potássio trocável no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).....	53
Figura 15 – Teor de fósforo no perfil do solo conforme o modo de aplicação de fósforo, com calcário incorporado (à esquerda) e calcário superficial (à direita).	56
Figura 16 – Teor de fósforo no perfil do solo com incorporação de calcário e aplicação superficial.	60
Figura 17 – Produtividade de grãos de soja (Mg ha^{-1}) em função do modo de aplicação de calcário e fósforo.	62
Figura 18 – Diferença relativa na produtividade de grãos de soja em relação a aplicação de fósforo incorporado ao solo.	62
Figura 19 – Estatura da soja (cm) no florescimento de acordo com o modo de aplicação de fósforo e calcário no solo.....	63
Figura 20 - Estatura da soja (cm) no estágio fenológico R2 de acordo com o modo de aplicação de fósforo e calcário no solo.....	63
Figura 21 – Massa de mil grãos da soja de acordo com o modo de aplicação de fósforo e calcário no solo.	64
Figura 22 – Produção de matéria seca da aveia de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.	65
Figura 23 – Produção de matéria seca total da parte aérea do trigo na maturação fisiológica de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo	66
Figura 24 – Concentração de fósforo no tecido da soja no florescimento de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.	74
Figura 25 - Concentração de cálcio no tecido da soja no florescimento de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.	74
Figura 26 - Concentração de magnésio no tecido da soja no florescimento de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.....	75
Figura 27 - Concentração de nitrogênio (%) no tecido total da parte aérea da soja no florescimento de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.....	75
Figura 28 - Concentração de nitrogênio (%) no grão da soja de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.	76

Figura 29 – Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 0 – 7 cm.	79
Figura 30 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 7 - 14 cm.	79
Figura 31 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 14 – 21 cm.	80
Figura 32 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 0 - 7 cm, na porção central.	82
Figura 33 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 0 - 7 cm, na porção lateral.	82
Figura 34 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 7 - 14 cm, na porção central.	83
Figura 35 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 7 - 14 cm, na porção lateral.	83
Figura 36 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 14 -21 cm, na porção central.	84
Figura 37 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 14 -21 cm, na porção lateral.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Atributos do solo na área experimental localizada no Assentamento Alvorada, em Júlio de Castilho/RS.....	38
Tabela 2 - Descrição dos tratamentos aplicados em maio de 2017 no experimento localizado no Assentamento Alvorada em Júlio de Castilho/RS	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA	18
1.2 OBJETIVOS	19
2 HIPÓTESES.....	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1 SOJA E SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	20
3.2 RAÍZES.....	22
3.3 ACIDEZ DO SOLO E CALAGEM	23
3.4 FÓSFORO: SOLO-PLANTA E MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA.....	29
4 MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL E IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO	35
4.2 COLETA DE SOLO	41
4.3 COLETA DE RAÍZES	42
4.4 COLETA E DETERMINAÇÃO DE PRODUÇÃO DE PLANTAS	43
4.5 ANÁLISES LABORATORIAIS	44
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1 ACIDEZ DO SOLO	45
5.2 SATURAÇÃO POR BASES E TEORES DE CÁLCIO E MAGNÉSIO NO SOLO.....	49
5.3 POTÁSSIO	53
5.4 FÓSFORO NO SOLO	54
5.5 DADOS DE PRODUÇÃO DE SOJA, AVEIA E TRIGO	60
5.6 CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES NO TECIDO DA SOJA.....	72
5.7 RAIZES.....	78
6 CONCLUSÕES	87
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max*) no Brasil possui grande importância no setor agropecuário e na alimentação humana como fonte proteica/lipídica, ocupando uma área cultivada no Brasil de 35,2 milhões de hectares, e 5692,1 hectares no Rio Grande do Sul (RS), correspondendo a cerca de 76 % das áreas de produção de grãos no estado, excetuando-se a cultura do arroz (CONAB, 2018), sendo em sua quase totalidade, cultivada sob sistema de plantio direto (SPD).

O manejo adotado em áreas sob SPD caracteriza-se pelo tráfego intenso de máquinas e implementos agrícolas que, associado a determinadas condições de umidade, leva à compactação do solo em camadas subsuperficiais, limitando o crescimento radicular. Também é cada vez mais expressivo nas áreas sob SPD a aplicação de fertilizantes e calcário na superfície do solo visando o incremento de rendimento operacional e uma semeadura em menor tempo, com menor demanda de utilização de implementos por unidade de área (OLIBONE & ROSOLEM, 2010), como observado por Caires (2005), onde houve maior lucratividade com aplicação de calcário superficial em comparação a incorporação de calcário, principalmente por não ter havido diferença produtiva da soja, bem como a incorporação de calcário exigir implementos pesados que demandam grande custo. A aplicação de fertilizantes na linha de semeadura também demanda maior potência do trator e diminui o rendimento operacional pelo tempo e logística no reabastecimento da semeadora-adubadora, portanto, a aplicação de fertilizantes na superfície do solo proporciona utilização de semeadoras com maior largura efetiva em relação a semeadora-adubadora, com a mesma potência do trator, implicando em semeadura em menor tempo (SU, 2015; PAVINATO & CERETTA, 2004).

A produtividade média de grãos da soja, no estado do RS, nos últimos 10 anos, foi de 2653,7 kg ha⁻¹, e na safra 2017/2018 foi de 3013 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018) um valor muito abaixo do potencial produtivo da cultura, pois diversos trabalhos e observações locais demonstram produtividade de grãos de soja superior a 4000 kg ha⁻¹, no RS e no Brasil, portanto a produtividade média de grãos de soja no estado possui potencial de incremento por não haver restrição ao acesso à mecanização agrícola moderna, fertilizantes, cultivares modernas e agroquímicos. A baixa produtividade de grãos da soja tem relação ao regime hídrico do estado e do Brasil, com peculiaridades microrregionais, onde são frequentes estiagens nos estádios de florescimento e enchimento de grãos que afetam drasticamente a

produtividade da soja (OYA, 2004), mas também ao manejo da fertilidade do solo, que ainda precisa de avanços técnicos de manejo, principalmente em relação à correção da acidez do solo e manejo da adubação fosfatada.

A correção da acidez do solo de forma eficiente é um fator crucial para a obtenção de produtividades satisfatórias, porém, essa prática é um assunto controverso quando se trata de SPD (CAIRES, 1998), pois, apesar de haver convergência de muitos pesquisadores em relação a maior eficácia da calagem quando esta é realizada de forma incorporada ao solo, explicada pela maior área de contato solo-correctivo, havendo uma correção mais uniforme em profundidade, existem trabalhos que consideram a aplicação superficial de calcário como boa ferramenta de correção da acidez do solo e obtenção de boa produtividade de soja (CAIRES, 2005; CAIRES, 1998; CAIRES, 2006; CAIRES & FONSECA, 2000) devido a não desestruturação do solo pela ação mecânica da incorporação de calcário, menor custo de aplicação, além de acarretar em menor risco de erosão.

A divergência de resultados encontrados na eficiência de neutralização da acidez do solo quanto ao modo de aplicação do calcário pode ser explicada por aspectos como o tipo de solo, a condição de acidez inicial do solo, bem como critérios e metodologias para estabelecimento de dose e calibração de métodos que possuem diferenças regionais. O que é consenso é que a velocidade de movimento vertical do calcário é lenta (RHEINHEIMER, 2000; KAMINSKI, 2005; CAIRES, 1998).

A calagem influencia a obtenção de fósforo (P) pelas raízes das plantas (TUSCHER, 2018), um dos nutrientes que mais limita a produtividade das culturas nos solos brasileiros (HINSINGER, 2001); a elevação do pH proporciona aumento na atividade e concentração dos íons OH^- em solução, promovendo assim redução na formação de precipitados de baixa solubilidade, como é o caso do P-Fe e P-Al (PROCHNOW, 2004; TUSCHER, 2018). Além disso, promove uma maior atividade da microbiota do solo, reduzindo a adsorção de P. Mas ainda assim, na maioria das vezes se faz necessária aplicação de adubação fosfatada a fim de suprir as necessidades nutricionais da planta.

Os modos de aplicação de P em solos sob SPD, também apresentam divergências de resultados e opiniões entre os pesquisadores; a recomendação técnica (CQFS, 2016) para culturas anuais é de aplicação na linha de semeadura, no momento do plantio, porém os trabalhos na área não apresentam um consenso a respeito do modo de aplicação de P mais eficiente, apresentando resultados positivos com aplicação de P na linha de semeadura (VALADÃO, 2017; BARBOSA, 2015; HANSEL, 2017; MOTOMIYA, 2004), com adubação fosfatada antecipada (PAVINATO & CERETTA, 2004; MATOS, 2006) e ainda, com

nenhuma diferença entre P aplicado na linha de semeadura ou na superfície do solo (TRES, 2017 p. 37; PETER, 2016). A aplicação em superfície apresenta vantagens pelo fato de permitir a utilização de implementos comparativamente com maior largura efetiva, porém, com a mesma demanda de potência, permitindo realizar a semeadura em menor espaço de tempo, o que diminui o custo operacional. Neste sentido, esforços para melhorar a aquisição de P pelas plantas têm aumentado, pelo fato deste ser um nutriente de alto custo e com reservas limitadas.

A disponibilidade de P às plantas, mediante a adubação fosfatada, é fortemente impactado pelo pH do solo e da solução do solo. Tucher (2018) e Saunders (1958) observaram um aumento da fração de P disponível às plantas, e maior produção das plantas, quando a fertilização fosfatada ocorreu em pH do solo entre 6,0 e 7,0. É importante salientar que a dessorção de P dos minerais do solo é pouco afetada pela alteração do pH do solo, pois a reação de dessorção não ocorre com mesma velocidade e intensidade que a adsorção, principalmente quando se trata do íon fosfato, como salientado por Barrow (2016). Segundo Igwe (2009) a adsorção de P por oxidróxidos de Fe e Al é fator de grande limitação à produtividade das culturas. Dentre os minerais que adsorvem P, a goethita possui grande capacidade de adsorção de P (WEI, 2014) e sua formação é favorecida em condições ácidas (KÄMPF, 2009 apud BORTOLUZZI, 2015).

Portanto, a associação do manejo da adubação fosfatada com a correção do solo deve ser realizada inseparavelmente e de forma equilibrada, melhorando a eficiência de recuperação de P pela planta. A resposta produtiva a dose de P varia drasticamente conforme o estado de acidez do solo avaliado, assim, a correção eficiente da acidez do solo proporciona resposta produtiva satisfatória com aplicação de menor dose de P, implicando em menor custo e manejo sustentável de fertilizantes.

Diante do exposto, é necessário aprofundar os conhecimentos sobre a mobilidade dos produtos resultantes das reações dos corretivos de acidez com o solo, bom como da adubação fosfatada.

1.1 PROBLEMA

A produtividade média de grãos de soja no Brasil e no RS está abaixo do potencial produtivo da cultura (CONAB, 2018). Em solos manejados sob SPD é crescente a aplicação de calcário e fertilizantes fosfatados na superfície do solo, que podem ter parcela de

participação na baixa produtividade média da cultura da soja no estado e no país. Este manejo de fertilizantes e calcário pode levar a redução da expressão da máxima produtividade da cultura da soja, devido a limitações de fertilidade e acidez do solo, principalmente em camadas de solo mais profundas. Aumentar a produtividade da soja, através do manejo de fertilizantes fosfatados e calagem, leva ao incremento de lucratividade dos produtores rurais, impactos positivos na economia do país, bem como potencial de atenuar a exploração de biomas naturais. O manejo inteligente da adubação e correção da acidez do solo podem aumentar a produtividade da soja, aumentar a eficiência de absorção de P, que consequentemente implica em diminuição da dose de fertilizante aplicado, bem como mitigar problemas ambientais como a lixiviação de nutrientes que se encontram na superfície do solo para águas superficiais.

1.2 OBJETIVOS

Avaliar o comportamento produtivo e o sistema radicular da cultura da soja quando a mesma é submetida a diferentes modos de aplicação de P e calcário no solo, bem como a alteração dos atributos químicos do solo causados pelos tratamentos.

2 HIPÓTESES

A aplicação de calcário superficial, possui limitação de correção da acidez do solo e Al^{+3} em camadas de solo mais profundas, bem como cria um alto gradiente de concentração Ca, Mg e valor de pH no perfil do solo, obtendo-se os maiores valores nos primeiros centímetros do perfil do solo, ao contrário da aplicação de calcário incorporado ao solo, que, quando feita de forma efetiva, apresenta correção da acidez do solo e Al^{+3} de forma homogênea no perfil do solo considerado.

A elevação de do pH do solo de forma homogênea com incorporação de calcário, acarreta em maior resposta produtiva da soja pela melhoria de absorção de P quando fertilizante fosfatado é aplicado em pH mais elevado e pelo favorecimento a FBN na cultura da soja.

A aplicação de fertilizante fosfatado na superfície do solo eleva o teor de P disponível apenas na região de deposição do fertilizante, não havendo mobilidade no perfil, portanto limita a absorção deste nutriente por haver severas restrições à absorção de P na camada superficial do solo, principalmente ligados a oscilação de umidade do solo, impactando negativamente a produtividade da soja.

A aplicação de P em subsuperfície, na região de exploração radicular, permite maior absorção deste nutriente e proporciona maior produtividade de grãos da soja em comparação a aplicação de P na superfície do solo.

Há um estímulo ao crescimento das raízes nas regiões do solo com maior teor de P, sendo na superfície do solo quando o P é aplicado superficialmente e em subsuperfície quando o P é aplicado em camadas do solo mais profundas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SOJA E SISTEMA PLANTIO DIRETO

A cultura da soja no Brasil é plantada em 35,2 milhões de hectares, e 5692,1 hectares no Rio Grande do Sul (RS), possuindo grande importância no setor agropecuário e na economia do país (CONAB, 2018). Em todo o mundo, o Brasil, Paraguai e Bolívia, correspondem a cerca de 95 % das áreas cultivadas sob SPD (MACHADO & SILVA, 2001). Isto reforça a necessidade de investimentos em pesquisa e extensão para aprimoramentos no SPD, bem como melhoria da produtividade e produção sustentável da cultura da soja nas mais heterogêneas regiões do país.

O SPD tem como diretrizes o não revolvimento do solo, manutenção de palha e/ou cobertura vegetal na superfície do solo todo o ano, rotação de culturas e cuidados sobre o tráfego de máquinas e implementos. A partir disto, é possível obter melhorias na fertilidade do solo, como aumento de matéria orgânica do solo (MOS), maior atividade biológica, estruturação e agregação do solo, melhor taxa de infiltração de água e melhor ciclagem de nutrientes (MACHADO & SILVA, 2001). No Brasil, com o aumento do valor das commodities agrícolas, houve uma grande expansão nas áreas com cultivo de soja sob SPD,

que pode ter levado a equívocos na implantação do sistema. Segundo a CQFS (2016), a implantação do SPD deve ser realizada corrigindo a acidez do solo e os nutrientes, principalmente P e potássio (K), na camada de solo de 0 – 20 cm, conduzindo posteriormente o solo sem revolvimento e com ininterrupta cobertura vegetal. Esta prática não foi adotada em grande parte das áreas de cultivo de soja, pois demanda um alto investimento inicial em insumos agrícolas, mão de obra e combustível. Com o crescente aumento dos custos de produção na cultura da soja no Brasil devido à elevação do preço das sementes, fertilizantes, calcário, combustível, máquinas e implementos agrícolas, houve um aumento da aplicação de fertilizantes e calcário na superfície do solo (OLIBONE, 2010). Esta prática cria um perfil de solo com alta heterogeneidade de nutrientes e acidez do solo, com predominância de acúmulo de P nos primeiros centímetros do perfil do solo, por ser um elemento imóvel, (CIOTTA, 2002; BAYER & MIELNICZUK, 1997 apud CIOTTA, 2002; SELLES, 1997 apud MACHADO & SILVA, 2001) que pode acarretar em decréscimo de produtividade.

Calegari (2013), realizou um diagnóstico da acidez do solo e distribuição dos nutrientes no perfil do solo em um experimento de 19 anos conduzido sob SPD e sistema de cultivo convencional, em um Latossolo Vermelho Alumino férrico no Paraná - RS. O autor observou no perfil de solo conduzido sob SPD por 19 anos, que abaixo da camada de solo de 0 - 5 cm, o pH do solo foi menor que 5,5, a saturação por bases menor que 60 % e o teor de P menor que o teor crítico de produtividade relativa estabelecido.

O diagnóstico do SPD de Calegari (2013) demonstra que com o passar do tempo o solo cultivado sob SPD pode levar a limitações da fertilidade do solo e aumento da acidez em camadas de solo subsuperficiais, bem como potencial de contaminação de águas superficiais pela erosão de nutrientes acumulados na superfície do solo, ressaltado pelo autor. Além da contaminação de águas superficiais, a lixiviação de nutrientes do solo acarreta em aplicação de maiores doses de fertilizantes para compensar as perdas superficiais, tornando o sistema pouco sustentável. A não mobilização do solo deve ser diretriz tomada na condução do SPD, porém, a correção de problemas relacionadas a acidez e distribuição de nutrientes no perfil do solo, são dificilmente resolvidos sem a mobilização do solo. A reintrodução do SPD, através de correção do perfil do solo na camada de solo de 0 – 20 cm, como previsto pela CQFS (2016), pode trazer benefícios a produtividade das culturas e fertilidade do solo.

3.2 RAÍZES

O número de estudos sobre o efeito da localização de aplicação de fertilizantes no comportamento de crescimento radicular e produtividade de grãos se intensificou nas últimas duas décadas (NKEBIWE, 2016). Busca-se compreender melhor os processos que interferem a distribuição radicular das plantas e suas implicações, bem como favorecimento de maior eficiência de absorção dos nutrientes do solo pelas plantas, visando uso racional e sustentável dos fertilizantes.

A distribuição e morfologia radicular pode ser alterada por estímulos ao crescimento, como por exemplo por N e P (NKEBIWE, 2016; GRANT, 2001; MARSCHENER, 2017, pg. 413), ou restrições, como exemplo a presença de Al (LIAO, 2006) que restringe o crescimento radicular. Estes processos precisam ser melhor compreendidos para nortear o manejo do solo e de fertilizantes, visando maior absorção de nutrientes pelas plantas, produtividade das culturas e adaptação as diversas condições edafoclimáticas.

Wang (2010) realizou uma revisão da literatura sobre a arquitetura radicular da soja e absorção de P, e Zao (2004) realizou um experimento com diferentes arquiteturas radiculares de soja visando buscar maior eficiência em recuperação de P pelas plantas. Estes autores afirmam que a arquitetura radicular da soja com disposição rasa, na superfície do solo, é mais eficiente na absorção de P, uma vez que o P se encontra em maior quantidade na superfície do solo e sugerem seleção de plantas comerciais com esta arquitetura radicular. Este conceito é coerente e perfeitamente plausível, porém é preciso observar o que diferentes cenários edafoclimáticos pode acarretar num sistema radicular de arquitetura rasa.

No Brasil a estação de cultivo da soja se dá em condições de alta temperatura média e máxima diária, baixa umidade do ar e alta incidência de radiação solar, sendo os maiores valores encontrados próximos ao florescimento da cultura onde há máximo índice de área foliar, intensificando o processo de evapotranspiração. Estes fatores, em cultivos não irrigados, levam a um rápido ressecamento da camada superficial do solo pela evapotranspiração, que afeta drasticamente a difusão do P no solo e absorção pelas raízes (DA COSTA & CRUSCIOL, 2016; GRANT, 2001). Devido ao comportamento reativo do P no solo, a absorção destes nutrientes pelas raízes se limita a cerca de 2 mm de distância da raiz, sendo criada uma região depletada em P, que favorece a difusão do íon fosfato de uma região de maior concentração (superfície dos minerais) para uma região de menor concentração

(rizosfera) de P (MARSCHNER, 2012, p. 351). A maior abundância de raízes na superfície do solo onde há presença de maior teor de P, via de regra no SPD, não significa necessariamente que toda a porção das raízes irá absorver P com mesma intensidade. Walk (2004), relata em seu estudo o fenômeno de competição de raízes na absorção de P, pois a sobreposição de raízes leva a inserção de raízes em regiões do solo já depletadas em P, portanto a absorção deste nutriente não ocorre de forma linear correlacionando-se com o comprimento de raízes.

Os genótipos de soja possuem grande variabilidade de comportamento de arquitetura e morfologia radicular como relatado por Bruno (2018), Wang (2010), e Zhao (2004). Esta variabilidade genética pode ser explorada buscando maior eficiência de recuperação de P e outros nutrientes pelas plantas nas diversas condições edafoclimáticas e de manejo do solo, bem como tolerância a períodos de restrição hídrica.

Favorecer uma melhor distribuição do sistema radicular da soja no perfil do solo, através de estímulos de manejo no solo e fertilizantes, pode ser uma boa estratégia para obtenção de água e nutrientes em camadas de solo subsuperficiais, de grande importância, principalmente em solos de textura arenosa com baixa capacidade de retenção de água e em regiões tropicais. A distribuição do sistema radicular de forma equilibrada no perfil do solo, deve estar acompanhada com manejo que permita absorção de nutrientes abaixo da superfície do solo, pois a emissão de maior número de raízes em subsuperfície em solos com baixo teor de P nesta região irá restringir a absorção deste nutriente, impactando negativamente no rendimento da cultura. Portanto, o manejo físico e de fertilização do solo deve atender estas necessidades.

3.3 ACIDEZ DO SOLO E CALAGEM

Os solos brasileiros, na sua grande maioria, possuem a característica de ser ácidos, com baixo teor de cátions, baixa saturação de bases e presença de Al^{+3} , que pode variar em função do material de origem do solo (RITCHEY, 1982 apud CAIRES, 1998; CAIRES, 2005; ERNANI, 2004; BALIGAR, 1986). Outro fator importante para essa característica é o clima brasileiro que em sua majoritária extensão apresenta temperatura e regime hídrico favoráveis ao intemperismo das rochas, pois a água, aliado à temperatura alta, que é um catalisador de reações, é o principal agente de intemperismo das rochas.

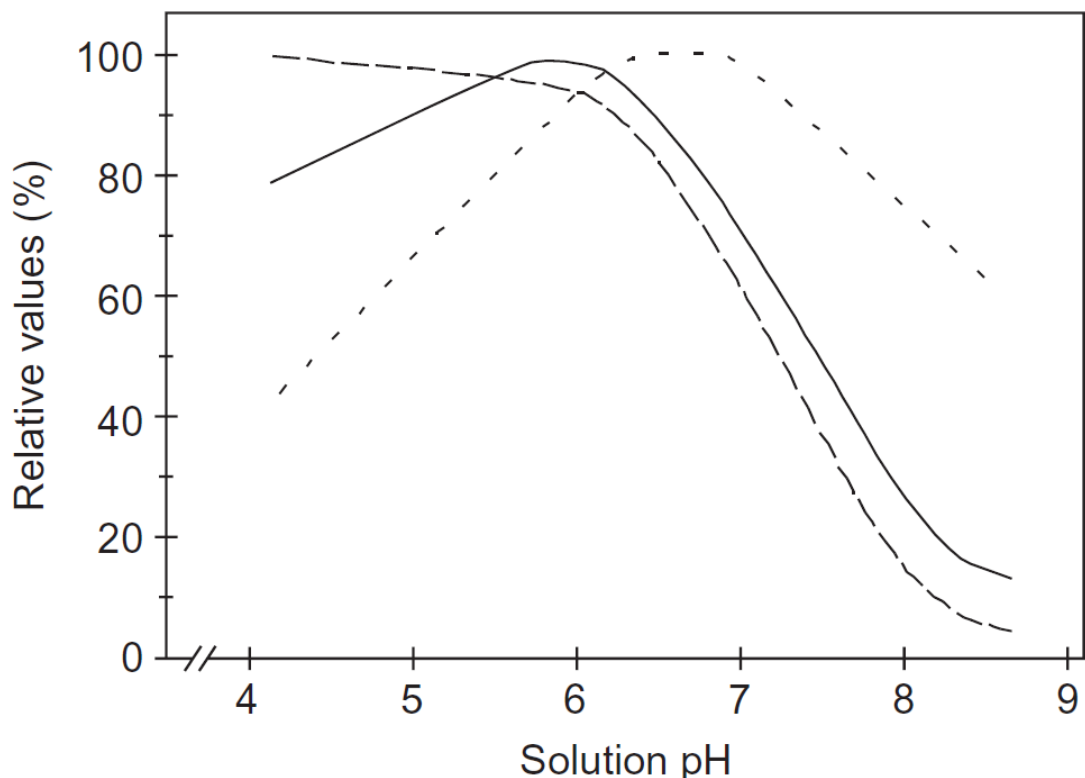
Ao precipitar na forma de chuva, a água reage com o CO_2 atmosférico formando bicarbonato (HCO_3^-) e hidrogênio (H^+); o H^+ age na solubilização da rocha pelo fenômeno de troca de ligantes, os íons H^+ ocupam os grupos funcionais antes ocupados por outros elementos, como o Al, Ca, Mg, K entre outros (NOVAIS, 2007 pg. 210), essas bases em geral apresentam moderada mobilidade no perfil do solo, porém o Al na sua forma trivalente apresenta alta reatividade com os grupos funcionais do solo e da MOS, com comportamento praticamente imóvel no perfil do solo (EIMIL-FRAGA, 2015), apresentando um equilíbrio na concentração adsorvida nos grupos funcionais do solo e na solução do solo, desta forma a percolação do Al no perfil do solo é muito lenta, assim, este elemento acumula-se na camada de solo onde se estabelecem as raízes das plantas. O Al na solução do solo, pela característica reativa, por meio de reações de hidrólise, rompe a ligação química da água, ligando-se com OH^- , possuindo variações de valência e espécies químicas, cada processo de hidrólise tem como produto o H^+ , que contribui para a acidificação do solo (NOVAIS, 2007 pg. 210; BARROW, 1985).

Além das reações químicas acidificantes na fase mineral no solo, outros processos naturais têm como produto final a liberação de H^+ no solo, como os processos biológicos de decomposição de material orgânico, que promovem a ionização do H de compostos de carbono da MOS (NOVAIS, 2017 pg. 211), bem como a exsudação radicular de ácidos orgânicos, adição de fertilizantes e manejo antrópico.

A acidez do solo é dividida em acidez ativa e acidez potencial. A acidez ativa é representada pela atividade de H^+ na solução do solo, que afeta diretamente as plantas e o comportamento de sorção dos nutrientes; e a acidez potencial, constituída pela soma de todas as fontes de H^+ existentes na fase sólida do solo, principalmente o Al trocável e os grupos funcionais orgânicos e inorgânicos, ou seja, ela é proporcional aos teores de Al, de argila e de matéria orgânica existentes no solo (ERNANI, 2008; NOVAIS, 2007 pg. 214). A acidez ativa do solo fornece dados para interpretação da dinâmica e comportamento dos nutrientes no solo e na solução do solo, expressa pelo valor do logaritmo negativo da concentração de H; já a acidez potencial do solo, segundo a CQFS (2016), é quem determina a dose de calcário a ser aplicada, pois refere-se a capacidade tamponante do solo, representada analiticamente pelos valores de $(\text{H}+\text{Al})$ ou de pH-SMP, que é uma solução tamponada a pH 7,5. Via de regra, solos argilosos de carga variável possuem maior acidez potencial, em comparação a solos arenosos, devido a maior abundância de grupos funcionais e MO, por isso são empregadas maiores doses de calcário para a correção da acidez do solo (CQFS, 2016).

A aplicação de calcário visa o controle da acidez ativa e potencial do solo, bem como a precipitação do Al^{3+} , além de elevar os teores de Ca e Mg no solo. A elevação do pH, pela ação dos íons HCO_3^- e OH^- liberados pelo calcário, modifica a superfície dos argilominerais e óxidos causando a deprotonação dos grupos funcionais Fe-OH, Al-OH e Si-OH, tornando a superfície mineral com predominância de cargas negativas (BARROW, 1999) o que afeta a dinâmica de sorção e absorção pelas plantas de cátions e ânions no solo. O pH do solo, que se reflete na solução do solo, afeta profundamente a absorção de P pelas raízes e altera as espécies químicas presentes na solução do solo, como mostrado na Figura 1 de Hendrix (1967) apud Marcshner (2017).

Figura 1- Relação entre o pH da solução do solo e a proporção de H_2PO_4^- (linha tracejada) em solução, e a absorção de fósforo (linha sólida) e sulfato (linha pontilhada) por plantas de feijão. Os dados se apresentam com valores relativos (HENDRIX, 1967 apud MARCSHNER, 2017, pg. 22).



Fonte: HENDRIX, 1967 apud MARCSHNER, 2017, pg. 22.

A CQFS (2016) recomenda que em solos cultivados sob SPD consolidado (10 anos ou mais) seja diagnosticada a camada de solo de 0-10 cm, com frequente monitoramento da condição química da camada de 10–20 cm. O pH desejado é de 6,0, porém o pH crítico para a tomada de decisão da aplicação do calcário é de 5,5, visando a neutralização de Al tóxico às plantas que é precipitado em formas não tóxicas às plantas acima de pH 5,5. Quanto ao critério de tomada de decisão para incorporação do calcário na camada de solo de 0-20 cm, o pH do solo deve ser menor que 5,5 e a saturação por Al maior que 30 % na camada de 10-20 cm, também é recomendada quando o teor de P na camada de solo de 10-20 cm for menor que o teor crítico estabelecido.

Apesar das recomendações, a aplicação de calcário incorporada ao solo perdeu espaço no SPD, principalmente pelo aspecto econômico, onde a incorporação de calcário ao solo demanda grandes operações mecanizadas com alto consumo de combustível e desgaste de maquinários e implementos agrícolas, além disso, a incorporação de calcário, segundo a CQFS (2016), deve ser realizada na camada de solo de 0 - 20 cm visando máxima homogeneidade no perfil de solo, o que demanda altas doses de calcário, aumentando o custo, tempo de operação e onerando o trabalho (CAIRES, 2005).

Caires (2005) apresenta uma análise econômica da aplicação de calcário incorporada e superficial em um Oxisol (clayey, kaolinitic, thermic Rhodic Hapludox) –em Ponta Grossa/PR, onde observou que a aplicação de calcário na superfície obteve um lucro 80 % superior em relação a incorporação de calcário, principalmente por não obter diferença de produtividade de grãos de soja no experimento conduzido.

O não revolvimento do solo, preconizado no SPD, também é um entrave à incorporação de calcário, justificado pelos benefícios na estruturação do solo, atividade biológica, dinâmica hídrica no solo, entre outros benefícios (MACHADO & SILVA & SILVA, 2001). Estes preceitos estão corretos, porém o solo é um sistema complexo e dinâmico, e sofre implicações devido às interferências internas e externas desse tipo de manejo, como alto trânsito de máquinas e implementos, ciclagem natural de nutrientes acumulando-se na superfície, reacidificação natural, manejo de fertilização, entre outros, diminuindo a fertilidade do solo, criando alta heterogeneidade química e biológica no perfil do solo, conseqüentemente levando ao decréscimo da produtividade e/ou a manutenção de baixo teto produtivo.

A incorporação homogênea de calcário na camada de solo de 0 - 20 cm traz benefícios, partindo do princípio de haver limitação de absorção de nutrientes na superfície do solo pela oscilação de umidade e pequeno volume de solo fértil e características peculiares de solos conduzidos sob SPD, como o acúmulo de nutrientes e alto pH nos primeiros cm do solo. A homogeneização de Ca e Mg no perfil do solo pode maximizar a absorção destes nutrientes pelas raízes pois existem teores destes nutrientes suficientes em todo volume de solo explorado pelas raízes, havendo melhora da nutrição das plantas.

A incorporação de calcário ao solo também permite uma homogeneidade de pH (6,0 – 7,0) no perfil do solo considerado, que, via de regra, melhora da atividade biológica, melhorando a ciclagem de nutrientes, agregação do solo, e a fixação biológica de nitrogênio (FBN) (Slattery, 2001).

O Ca é um cátion bivalente com grande raio iônico quando está hidratado, característica essa confere relativa mobilidade no perfil do solo, possui função estrutural na parede celular das plantas e regulador de macromoléculas, podendo corresponder a 10 % da MS das folhas maduras e sua mobilidade no floema é reduzida (MARSCHNER, 2012, p. 171). Devido a baixa mobilidade do Ca no floema, é possível que em períodos de restrição de absorção deste nutriente na superfície do solo, somado a aumento de demanda da planta, haja restrição no crescimento, devido a não translocação deste nutriente para tecidos em expansão. Da mesma maneira que o P, a melhor distribuição de Ca no perfil do solo através da incorporação de calcário, pode melhorar a absorção deste nutriente em períodos secos.

Kaminski (2005), comparando a alteração dos atributos do solo com calagem incorporada e superficial no solo, em um Argissolo Acinzentado Distrófico plúntico, em Santa Maria – RS, observou que após sete anos da aplicação do calcário na superfície do solo, o aumento de pH se deu até 10 cm de profundidade do solo, enquanto que na aplicação de calcário incorporada ao solo o aumento de pH ocorreu até 25 cm de profundidade, observando o mesmo comportamento para Al trocável, Ca e Mg; é possível que a aplicação de calcário em superfície seja ainda mais limitada em solos com maior teor de argila, devido à maior adsorção dos íons neutralizadores pelos grupos funcionais na superfície do solo.

Rheinheimer (2000), observou em um Argissolo Acinzentado distrófico plúntico em Santa Maria - RS, após 48 meses da aplicação calcário, que na camada de solo de 10 - 15 cm a saturação por Al foi de 6 % na aplicação de calcário incorporado, enquanto que na aplicação de calcário superficial foi de 41 %.

Rheinheimer (2018) avaliando o efeito residual da aplicação superficial de calcário em um Ultisol de textura média, em Santa Maria – RS, na maior dose aplicada observou que, após 12 anos de aplicação de 6 t de calcário ha⁻¹ (subdividido em 5 anos), o pH crítico de 5,5 foi satisfeito apenas no primeiro centímetro de profundidade do perfil do solo. Corroborando com este comportamento do calcário aplicado superficialmente, Caires (2008) sob um Oxisol (loamy, kaolinitic, thermic typic hapludox), aplicou 6 t ha⁻¹ de calcário em 1993 e mais 3 t ha⁻¹ de calcário em 2000, ambos na superfície do solo, 3 anos após a última aplicação observou que na camada de solo de 5-10 cm, o pH do solo encontrava-se inferior a 5,5, favorecendo a presença de Al. A aplicação de calcário na superfície do solo, como método de baixo custo e viável no controle da acidez superficial do solo é citada por Caires (2005), Caires (2006) e Oliveira e Pavan (1996). Em SPD há resistência quanto à adoção de ação mecânica no solo, visando os benefícios do não revolvimento do solo, porém, áreas de SPD, onde nunca houve incorporação de calcário, a camada de solo abaixo de 10 cm, dificilmente atinge pH e saturação por Al adequados.

É necessário discernimento para interpretar a alteração dos atributos químicos do perfil do solo pela incorporação ou aplicação superficial de calcário, pois, a diminuição da acidez do solo, da saturação por Al, incremento de Ca e Mg, estatisticamente, não significa, obrigatoriamente, melhor crescimento das plantas e incremento de produtividade. Nesse sentido, cabe a interpretação agrônômica, baseado nos teores críticos de cada parâmetro, testados e estabelecidos para obtenção de produtividade satisfatória, como descrito por Rheinheimer (2018), onde após 12 anos de aplicação de calcário superficial sobre um Ultisol de textura média, em Santa Maria – RS, na maior dose, a análise estatística mostrou alteração do pH do solo até 60 cm de profundidade, enquanto, sob a ótica agrônômica (CQFS, 2016) o pH crítico foi atingido apenas até 2 cm de profundidade.

O pH médio dos primeiros 10 cm do solo, obtidos via análise de solo, não traz informações suficientes para a interpretação da condição de acidez de um solo, pois é possível e comum que haja alta heterogeneidade nesta camada de solo de parâmetros relacionados a acidez do solo, portanto é mais prudente monitorar esta camada de solo de forma estratificada.

3.4 FÓSFORO: SOLO-PLANTA E MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA

O P é um macronutriente essencial às plantas, e impacta diretamente a produtividade da soja (LEITE, 2017; MARIN, 2015; CAVALLI, 2016). Na planta, uma vez que o P é absorvido, em pouco tempo, é incorporada aos compostos orgânicos e parte é depositada no vacúolo celular, onde é gradualmente liberado para o citosol à medida que os processos metabólicos demandem (MARCHNER, 2012, pg. 160). Apesar do P apresentar concentração nos tecidos inferior a outros macronutrientes, desempenha funções de suma importância, sendo componente estrutural, na forma de fosfolípido, na membrana plasmática celular e dos ácidos nucleicos como DNA e RNA, que são as moléculas base para a informação de síntese de proteínas, que apresenta alta demanda em tecidos jovens em expansão e diferenciação celular, estando presente também nos processos de transferência de energia, predominando na forma de ATP, onde tem grande importância para todos os processos metabólicos que demandam energia (MARCHNER, 2012, pg. 160, GRANT, 2001).

O P no solo se divide em dois grandes grupos, P orgânico e inorgânico, com duas espécies químicas predominantes na solução do solo, H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} (BARROW, 2016). Em sistemas naturais, sem adição de fertilizantes, a fração de P orgânico possui grande importância na nutrição de plantas (VINCENT, 2010 apud CALEGARI, 2013) e garantia de estabilidade de fornecimento de P ao longo do tempo, devido à ciclagem natural dos nutrientes presentes na forma orgânica pela ação de microrganismos. Além disso, há abundância biológica e associações simbióticas com plantas, pouco compreendidas. Em solos cultivados, como no SPD, a fração de P inorgânico possui a maior participação na nutrição das plantas, devido à maior abundância no solo e a grande exigência e taxa de absorção de P pelas cultivares de soja modernas com alto teto produtivo.

O P inorgânico é encontrado de duas formas no solo, adsorvido aos grupos funcionais minerais e nos minerais primários do solo (RHEINHEIMER, 2008), este último, de baixa solubilidade, baixa taxa de dessorção de P para a solução do solo, dependendo da acidez do meio e processos biológicos para que haja solubilização. O P adsorvido encontra-se principalmente nos grupos funcionais OH^- dos oxidróxidos de Al e Fe bem como nos grupos funcionais silanol e aluminol das argilas silicatadas, sendo passível de dessorção (RHEINHEIMER, 2008; IGWE, 2009; PARFITT, 1978).

A ligação química do fosfato com os grupos funcionais, via de regra, possui alto grau de covalência, havendo intensidades distintas de energia de ligação do P com os grupos funcionais, onde são encontradas ligações monodentadas, bidentadas e binucleadas, com energia de ligação crescente e possibilidade de dessorção decrescente, respectivamente (PARFITT, 1989 apud RHEINHEIMER, 2008; PARFITT, 1978). A reação de adsorção não é estável e tende, com o passar do tempo, a aumentar a energia de ligação com os grupos funcionais com penetração do íon fosfato nos argilominerais, diminuindo a fração de P dessorvível (BARROW, 1999; BARROW, 2016; RHEINHEIMER, 2008).

A energia e tipo de ligação do P com os grupos funcionais dos minerais, é influenciada pelo pH do meio (GUNJIGAKE & WADA, 1981), onde em condições de pH ácido (na fertilidade do solo, abaixo de 5,5), devido à abundância de prótons, os grupos funcionais OH^- tendem a estar protonados (H ligado a oxigênio); a protonação dos grupos funcionais torna a superfície dos minerais com predominância de cargas positivas, favorecendo a aproximação do íon fosfato ao mesmo tempo que diminui a energia de ligação do radical OH^- com o metal do mineral (Al e Fe), favorecendo o fenômeno de troca de ligantes (PARFITT, 1978 pg. 11).

Devido a estes fenômenos químicos, a concentração de fosfato na solução do solo, onde as plantas absorvem este nutriente, é extremamente baixa, e a taxa de dessorção de fosfato para a solução do solo ocorre, via de regra, de forma lenta (GRANT, 2001), e depende energia de ligação e concentração de P passível de dessorção (P lábil, adsorvido nos grupos funcionais) (PARFITT, 1978). O pH da solução do solo determina as formação de determinadas espécies químicas de fosfato, onde em pH inferior a 7,0 predomina a espécie química H_2PO_4^- , pela maior concentração de H e em pH próximo a 7,0, predomina a espécie química HPO_4^{2-} , sendo que a concentração de HPO_4^{2-} aumenta 10 vezes a cada aumento unitário de pH, na faixa de pH de 2,5 (pK1) a pH 7,0 (pK2), porém até pH 6,0 a espécie química predominante é de HPO_4^{2-} (BARROW, 1978; BARROW, 2016). Hendrix (1967) apud Marschner (2012, p.22) relata a proporção de da espécie química H_2PO_4^- em solução bem como a absorção de P por plantas de feijão (Figura 1) e observou um pequeno decréscimo de H_2PO_4^- na solução do solo até pH 6,0 e máxima absorção de P pela planta em pH 6,0, portando, o pH do solo onde é depositado o fertilizante fosfatado pode afetar a absorção deste nutriente pelas plantas.

As raízes das plantas absorvem P exclusivamente da solução do solo, principalmente na forma de H_2PO_4^- (BARROW, 2016), pelo fenômeno de difusão, onde o íon fosfato se movimenta de uma região de maior concentração para a região da rizosfera depletada,

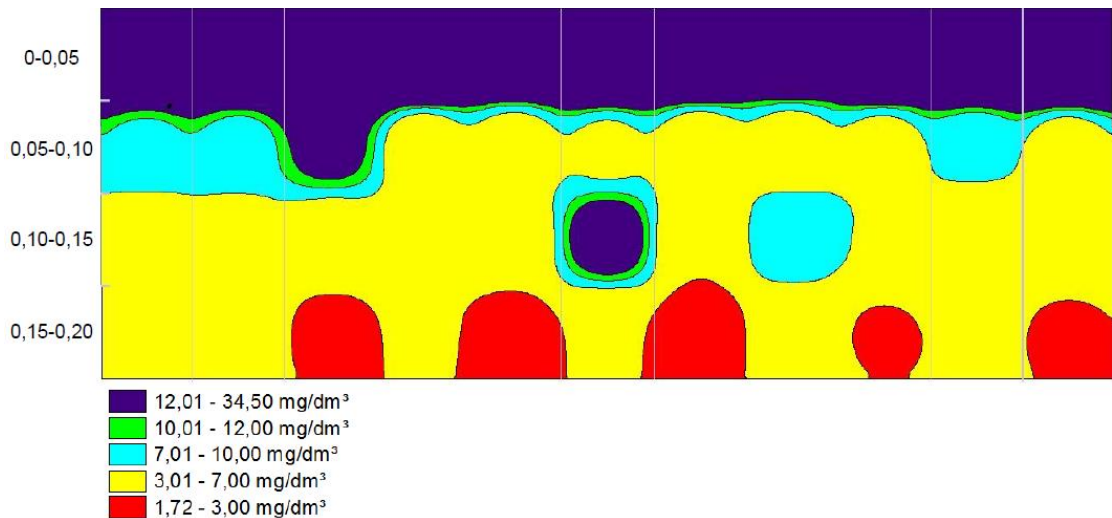
contudo este fenômeno se dá a uma pequena distância da raiz (2 mm) e depende de boas condições de umidade do solo para a movimentação do íon (WALK, 2004; MARSCHNER, 2012, p. 317). Somado a isto, é conhecido que as raízes das plantas ocupam um pequeno volume de solo, menos de 5 % da camada de solo com exploração efetiva pelas raízes (ANGHINONI & BARBER, 1980 apud BORKERT & BARBER, 1985), e a absorção de P se dá em zonas específicas do sistema radicular, limitando o acesso a grande parte do P na solução do solo e que é passível de ser absorvido pelas plantas.

Além disso, a distribuição espacial de P no solo pode interferir na absorção de P pelas raízes das plantas, onde no SPD devido ao não revolvimento do solo, a maior concentração de P encontra-se nos primeiros centímetros no perfil do solo e ocupa um pequeno volume de solo (SELLES, 1997 apud MACHADO & SILVA, 2001), região que sofre rapidamente diminuição do teor de umidade devido ao contato com ar atmosférico, incidência de radiação e evapotranspiração, o que, somado aos fenômenos anteriormente citados, limita o acesso e a absorção pelas plantas.

Os modos de aplicação de P em áreas cultivadas sob SPD na cultura da soja e demais culturas anuais, apresentam divergência de resultados em diversos trabalhos científicos. Existem problemas metodológicos na elaboração de experimentos, principalmente quando a condição inicial do solo onde se submete a diferentes tratamentos como modos de aplicação de P. É sabido que a resposta da cultura da soja ao modo de aplicação de P é altamente dependente do teor de P inicial do solo, da sua distribuição no perfil do solo e da acidez do solo (TUSCER, 2018; SAUNDERS, 1958), condições estas que apresentam alta variabilidade nos trabalhos científicos publicados na área.

A aplicação de P na superfície do solo vem sendo adotada com alta frequência nas áreas de cultivo de soja sob SPD, sob a justificativa de melhor rendimento operacional de máquinas, implementos, semeadura em menor tempo e de não haver incremento de produtividade que justifique a aplicação de P na linha de semeadura. Este manejo de adubação fosfatada cria um gradiente de concentração de P acentuado (Figura 2), sendo o teor de P acima do teor crítico limita-se a 5 cm de profundidade, o que é agravado em solos com maior teor de argila e óxidos Fe e Al (MOTTA, 2002; SELLES, 1997 apud MACHADO & SILVA, 2001).

Figura 2 - Disposição espacial do teor de P no solo com aplicação de P na superfície do solo.



Fonte: Tres, 2017 pg. 55.

Alguns trabalhos mostram que em áreas cultivadas sob SPD, a aplicação de P na linha de semeadura não incrementa produtividade na cultura da soja em relação à aplicação superficial (TRES, 2017, pg. 36; PETER, PÜTTKER, 1999, pg. 19), isso pode ocorrer em condições de alto teor de P presentes no solo e onde a deposição do P na linha de semeadura ocorreu em condições de pH desfavorável à dinâmica de sorção do P, havendo grande adsorção do nutriente nos grupos funcionais do solo, causando impactos negativos na absorção de P pelas plantas (TUCHER, 2018). Este fenômeno justifica também o maior índice de eficiência agrônômica do P do fertilizante, quando aplicado em superfície, em algumas situações, como observado por Motomiya (2004).

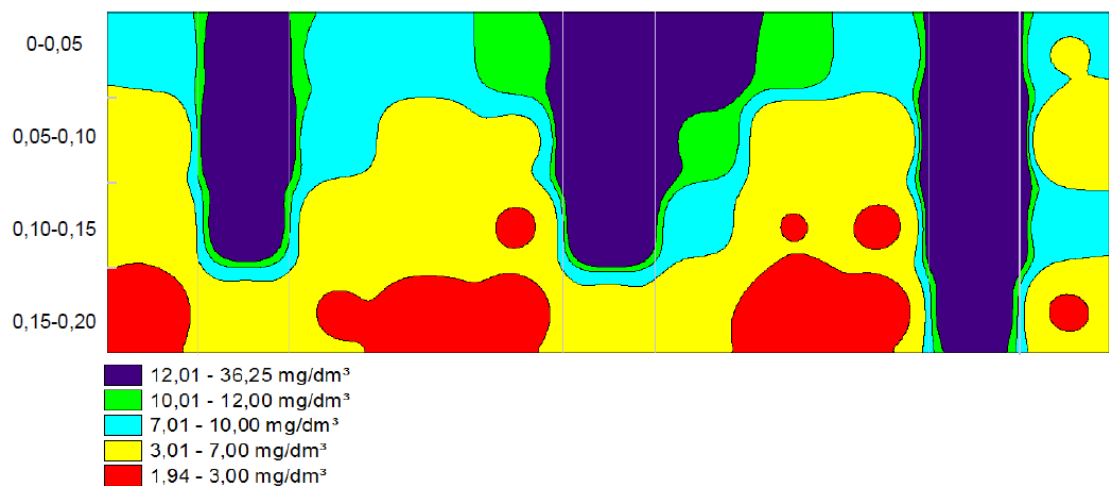
Por outro lado, a aplicação de P na superfície do solo pode levar a perdas diretas do fertilizante e do solo rico em P dos primeiros centímetros no perfil do solo, principalmente pela erosão do solo, que ocorre com alta frequência no SPD, devido à diminuição da taxa de infiltração do solo e não adoção de medidas conservacionistas do solo, como a construção de terraços, levando à diminuição do teor de P na superfície do solo e contaminação das águas superficiais (CALEGARI, 2013; CAPOANE, 2015).

A aplicação de P na linha de semeadura tem por objetivo depositar o P o mais próximo possível de todo o sistema radicular da planta, a fim de facilitar a absorção deste nutriente pela elevação da concentração de P em formas mais disponíveis (NKEBIWEA, 2016) porém para que esta prática tenha eficiência é necessária a associação com boas práticas de correção

do solo, pois como citado anteriormente, a região de deposição de P neste modo de aplicação em SPD frequentemente apresenta problemas de acidez, restringindo a dessorção de P para a solução do solo e diminuindo a eficiência de recuperação do P pela planta (TUCHER, 2018; SAUNDERS, 1958).

A aplicação de P na linha de semeadura apresenta a vantagem de realizar o rompimento de eventual camada de solo superficial com compactação logo abaixo da planta, pela ação do sulcador da semeadora-adubadora, o que pode diminuir a resistência mecânica à penetração do sistema radicular. Quanto à distribuição espacial do nutriente no solo, a aplicação de P na linha de semeadura apresenta limitação, pois a região de deposição do nutriente se limita a um pequeno volume de solo e com formato linear ou cilíndrico logo abaixo da semente, somado a baixa exploração volumétrica do sistema radicular (JUNGK, 1984, apud MARSCHNER, 2012 p. 323) pode limitar a absorção (Figura 3).

Figura 3- Disposição espacial do teor de P no solo com aplicação de P na linha de semeadura.

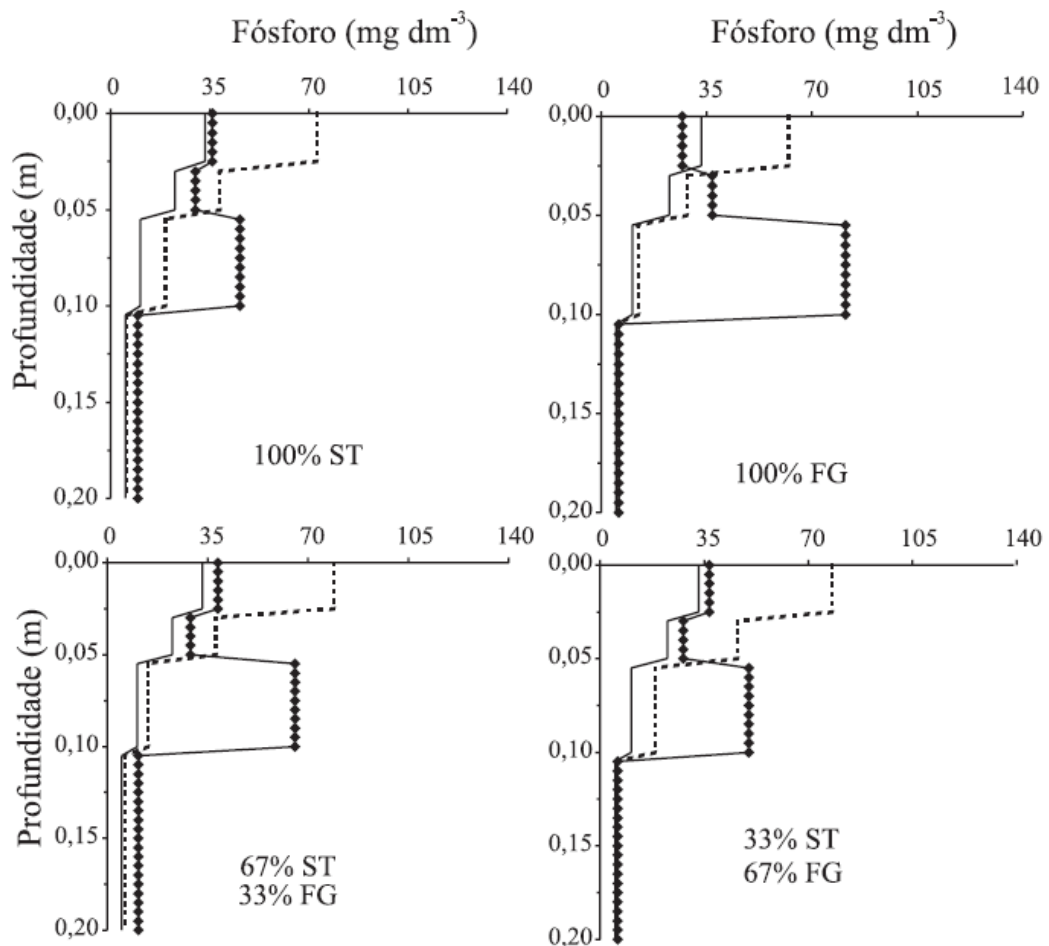


Fonte: Tres, 2017 pg. 57.

O espaçamento entre linhas na semeadura da soja (50 cm) e o pequeno espaçamento entre plantas pode limitar a absorção do P aplicado, pois aumenta a competição entre as raízes das plantas na linha de semeadura e a distância da linha de semeadura lateral (WALK, 2004). Partindo deste princípio, é possível que a redução do espaçamento na cultura da soja como melhor disposição espacial das plantas, melhore a aquisição de P pelas plantas (KURIHARA,

2016). Apesar de haver estas limitações a distribuição espacial com aplicação de P na linha de semeadura, este modo de aplicação possui a vantagem de aumentar o teor de P na camada de solo abaixo de 5 cm de profundidade, de forma relativamente homogênea, com o passar do tempo e sucessão de cultivos, principalmente quando o solo é fertilizado na estação de inverno no cultivo de gramíneas de estação fria, aumentando o volume de solo fértil que é exposto às raízes das plantas, como observado por Motomiya (2004) com aplicação de superfosfato triplo na linha de semeadura (Figura 4).

Figura 4 - Teores de P no solo em diferentes profundidades, com aplicação na linha de semeadura e na superfície do solo. Testemunha (Linha preenchida), sulco (Linha pontilhada espessa) ea lanço (Linha pontilhada estreita).



Fonte: Motomiya (2004) pg. 310.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL E IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado na cidade de Júlio de Castilhos, região central do Rio Grande do Sul, Brasil, no assentamento de reforma agrária Alvorada, coordenadas geográficas 29°21'44.51"S, 53°39'2.70"O. A altitude é de 500 m, o relevo se caracteriza como suave ondulado com declividade de 6 %, o clima é classificado como Cfa segundo a classificação de Köppen-Geiger, a temperatura média anual e pluviosidade média anual são de 18.1 °C e 1740 mm, respectivamente, sem estação seca definida, e chuvas regulares durante o ano. O solo é caracterizado como um Argissolo Vermelho Distrófico típico, com 20 % de argila na camada de solo de 0-20 cm.

Figura 5– Localização experimento no assentamento Alvorada, Júlio de Castilhos – RS



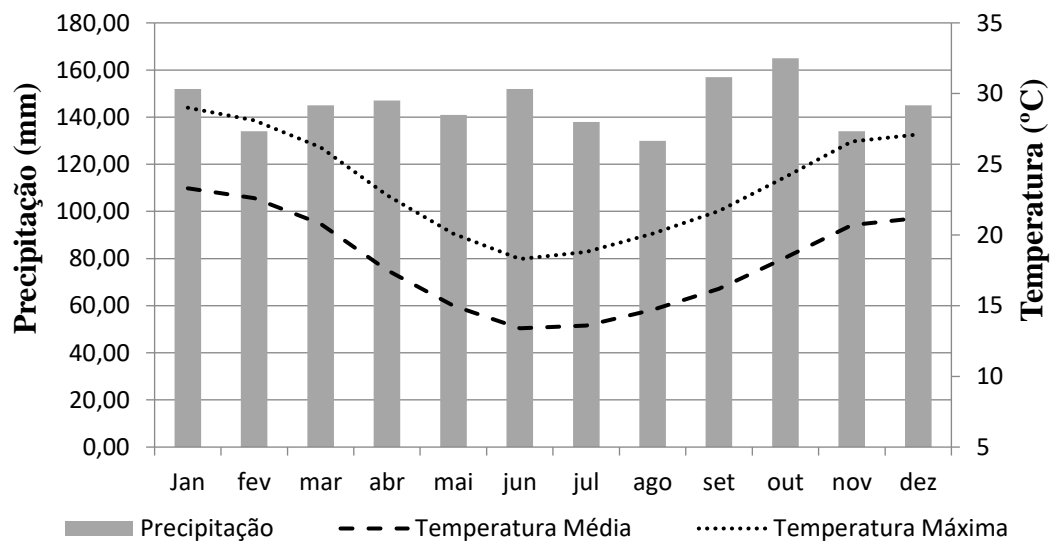
Fonte: Google Maps, 2019.

Figura 6– Localização experimento no assentamento Alvorada, Júlio de Castilhos – RS



Fonte: Google Earth, 2019.

Figura 7 - Normais climatológicas da cidade de Júlio de Castilhos



Fonte: Climate-Data.org

Até 1997 a área experimental era utilizada para produção de bovinos de corte sob campo nativo. A partir de 1997, a área foi conduzida sob cultivo mínimo, com eventual uso de

grade de discos superficial a fim de cobrir as sementes de forrageiras de inverno, sendo cultivado soja, milho, milho silagem no verão e pastagem de aveia no inverno para a alimentação de bovinos de leite. A área recebeu calagem superficial em três oportunidades, em 2002, 2012 e 2015, na dose de $1,5 \text{ t ha}^{-1}$.

Para a implantação do experimento foram construídos terraços de contenção de base estreita, utilizando arado de disco, com distância entre terraços de 15 m, como medida de conservação do solo e para que se evitasse qualquer movimentação lateral de fertilizantes e calcário para parcelas com tratamentos distintos em condições de alta intensidade pluviométrica. Entre os terraços foram delimitadas as parcelas acompanhando a curva de nível, assim, as parcelas tinham áreas que variavam de 180 a 220 m², perfazendo uma área total de 1 ha. O delineamento experimental adotado foi o de blocos inteiramente casualizados, com 4 repetições.

Em janeiro de 2017 foi realizada coleta de solo a fim de caracterizar a área experimental (Tabela 1) e obter as informações para interpretação e determinação da dose dos corretivos. A área experimental era homogênea, e conhecida por haver outros experimentos próximos conduzidos pela Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), desta forma foram abertas 6 trincheiras, de forma randômica na área, com pá de corte, com dimensões de 50x50x50 cm, e coletado solo com 2 subamostras de faces distintas da trincheira, nas camadas de solo de 0 - 5, 5 - 10, 10 - 15, 15 - 20, 20 - 25, 25 - 30, 30 - 35 e 35 - 40 cm.

Tabela 1-Atributos do solo na área experimental localizada no Assentamento Alvorada, em Júlio de Castilho/RS.

Camada	Argila	MO	pH	H+Al¹	P²	K²	V%³	m%³
cm	%		H ₂ O	cmol _c dm ⁻³	mg kg ⁻¹			
0 - 5	22	2,7	6,0	2,8	12,2	81	58	1
5 - 10	22	2,2	5,4	4,8	4,5	48	32	11
10 - 15	24	1,6	4,9	8,2	2,2	37	14	42
15 - 20	22	2,4	4,7	10,3	1,7	36	9	59
20 - 25	22	1,8	4,7	12,1	1,7	42	7	66
25 - 30	28	1,8	4,7	13,4	1,6	44	5	72
30 - 35	29	1,7	4,7	14,2	1,3	41	5	73
35 - 40	32	1,6	4,7	14,1	1,3	37	5	75

¹Equação Kaminski (2001) CQFS (2016); ²extraído por Mehlich-1; ³ saturação por bases e por Al, respectivamente, cálculo segundo CQFS (2016)

O solo da área apresentava baixa fertilidade, a correção química foi realizada de acordo com o manual de adubação e calagem para os estados do RS e SC (CQFS, 2016), para os teores de P, K, calagem e demais adubações considerando a produtividade almejada para soja e trigo. O P se encontrava na classe de disponibilidade muito baixa e o K baixa, segundo CQFS (2016).

O experimento foi implantado em maio de 2017 com cultivo de aveia preta (*Avena strigosa*) no inverno como planta de cobertura para a cultura da soja, nesta ocasião, foram aplicados calcário e P conforme os tratamentos. A implantação do experimento foi realizada no inverno com a cultura da aveia preta visando melhores condições para calagem e maior homogeneidade de distribuição dos fertilizantes na área, do P nos tratamentos em que este foi aplicado na linha de semeadura, e do K em todos os tratamentos, devido ao espaçamento reduzido da cultura da aveia (17 cm), e também devido ao fato da umidade do solo ser maior no período de inverno, pois nesta estação há menor evapotranspiração, menor radiação incidente e maior umidade do ar.

O experimento consiste de 7 tratamentos, com 4 modos de aplicação de P e 2 modos de aplicação de calcário: T1 - P incorporado com calcário incorporado, T2 - P na linha de semeadura com calcário incorporado, T3 - P na linha de semeadura com calcário na

superfície, T4 - P na superfície com calcário incorporado, T5 - P na superfície com calcário na superfície, T6 – Sem P com calcário incorporado e T7 – Sem P com calcário na superfície (Tabela 2). A partir da implantação do experimento o manejo adotado foi de SPD, seguindo as recomendações do Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS, 2016), e todas as operações de manejo foram realizadas com mecanização agrícola convencional do SPD, com deposição de adubo via semeadora com sulcadores de disco (profundidade de 7 cm), exceto a aplicação de N que foi realizada manualmente em cada parcela.

Tabela 2 - Descrição dos tratamentos aplicados em maio de 2017 no experimento localizado no Assentamento Alvorada em Júlio de Castilho/RS

Tratamento	Modo de aplicação de P	Modo de aplicação do calcário	Dose de P₂O₅ kg ha ⁻¹	Dose de calcário t ha ⁻¹
T1	Incorporado ao solo	Incorporado	160	
T2	Linha de semeadura	Incorporado	160	7
T3	Linha de semeadura	Superficial	160	7
T4	Superfície do solo	Incorporado	160	7
T5	Superfície do solo	Superficial	160	7
T6	Sem P	Incorporado	0	7
T7	Sem P	Superficial	0	7

O calcário foi aplicado na dosagem de 7 t ha⁻¹ conforme recomendações da CQFS (2016) para elevar o pH para 6,0; foi utilizado o calcário dolomítico, com PRNT 70 %. A aplicação foi realizada utilizando um caminhão com distribuidor a lanço em toda a área, permanecendo (o solo) nesta condição nos tratamentos com calcário superficial; após aplicado calcário, nos tratamentos com calcário incorporado, foi feita a incorporação do calcário à 20 cm de profundidade no solo, por meio de duas arações (arado de disco) e uma gradagem de nivelção do solo (grade niveladora), visando maximização da homogeneização do calcário no perfil de solo considerado. Na mesma operação da incorporação do calcário no solo, no

tratamento P incorporado, incorporou-se também superfosfato triplo (SFT) na dose de correção do solo.

O P foi aplicado na dosagem de 160 kg de P_2O_5 , conforme recomendado pela CQFS, (2016), para elevar o teor de P no solo até o teor crítico de 18 mg/kg, como fonte foi utilizado o SFT, com composição de 45 % de P_2O_5 e solubilidade de 41 % em água. A aplicação de P, no tratamento P incorporado, foi aplicado P ao solo e incorporado a 20 cm, juntamente com o calcário, por meio de duas arações e uma gradagem, a aplicação para produção (soja e trigo) foi realizada na linha de semeadura, para a manutenção da condução do tratamento sob SPD; nos tratamentos com aplicado P na linha de semeadura, a dose de P de correção e a de produção foram realizadas na linha de semeadura, aplicadas a 7 cm de profundidade; no tratamento com P na superfície, o P foi aplicado a lanço na superfície do solo, no momento da semeadura; e o tratamento sem P, não recebeu nenhuma aplicação.

O K foi aplicado em todos os tratamentos na dose de correção de 60 kg ha^{-1} de K_2O para elevar o teor de K no solo até o teor crítico de 90 mg kg^{-1} , na forma de cloreto de potássio (KCl) (60 % de K_2O) na linha de semeadura à 7 cm de profundidade, sendo aplicado deste modo em todos os cultivos subsequentes. A partir da correção dos teores de P e K no solo, foram aplicados fertilizantes nas doses de produção segundo a CQFS (2016). Nas operações em que o P foi aplicado na linha de semeadura, misturou-se KCl com SFT, manualmente, antes da semeadura, para obter-se a fórmula ideal e realizar a adubação de P e K nas culturas no mesmo sulco de semeadura.

A aveia preta foi semeada em maio de 2017, com uma população de 350 plantas m^{-2} , com trator e semeadora-adubadora mecanizada, com espaçamento de 17 cm, sem adubação de P e K complementar, apenas as doses de P e K de correção da implantação do experimento. No estágio fenológico V4 foi aplicado N na forma de ureia (45% de N), na dose de 40 kg de N ha^{-1} na superfície do solo distribuído manualmente em todos os tratamentos. A aveia preta foi dessecada 15 dias antes da semeadura da soja com glifosato.

A soja foi semeada em novembro de 2017, foi utilizada a cultivar Don Mario 5958 que apresentou alto teto produtivo em testes realizados na região, com espaçamento de 45 cm, utilizando trator e semeadora mecanizada, com uma população de plantas de 280 mil plantas ha^{-1} , conforme recomendação técnica para a região agrícola e data de semeadura. As sementes de soja foram tratadas com fungicida, inseticida e inoculadas no dia da semeadura com *Rizhobium* específico.

Na semeadura da soja foi aplicado 75 kg de P_2O_5 , segundo recomendação da CQFS (2016), para expectativa de rendimento de grãos de 5 t ha^{-1} , na forma de SFT, de acordo com os respectivos modos de aplicação dos tratamentos e 125 kg de K_2O , segundo recomendação da CQFS (2016) para a expectativa de rendimento de grãos de 5 t ha^{-1} , na linha de semeadura em todos os tratamentos, na forma de KCl. Nos tratamentos com aplicação superficial de P, o mesmo foi aplicado na superfície do solo após a semeadura da soja, no mesmo dia, visando evitar qualquer incorporação de fertilizante no solo causado pela mobilização do solo pela semeadora.

Também foi aplicado em todos os tratamentos 20 kg ha^{-1} de enxofre (S) na forma de sulfato de cálcio (20 % de S) na superfície do solo no estágio fenológico V4 da soja, visando maior aproveitamento do nutriente por haver maior abundância de raízes capazes de absorver o nutriente e uma vez que o ânion sulfato possui mobilidade do perfil do solo. Foi realizada aplicação de 400 ml ha^{-1} de fungicida FOX (Bayer) no final da fase vegetativa, e 300 ml ha^{-1} fungicida Aproach Prima (Du Pont) no estágio fenológico R2.

Em junho de 2018 foi semeado trigo (*Triticum aestivum*), a fim de observar o comportamento de uma espécie gramínea frente os tratamentos. Foi utilizada a cultivar TBIO Sinuelo, com espaçamento de 17 cm, e população de 380 plantas m^{-2} . Na semeadura, foi aplicado 45 kg de P_2O_5 , conforme recomendação da CQFS (2016), na forma de SFT, de acordo com os respectivos modos de aplicação dos tratamentos e 30 kg de K_2O , na forma de KCl, conforme recomendação da CQFS (2016), na linha de semeadura em todos os tratamentos. Foi realizada uma aplicação de N em cobertura no estágio fenológico V4 e na dose de 60 kg ha^{-1} , na forma de ureia. Expectativa de rendimento foi de 3 t ha^{-1} .

4. 2 COLETA DE SOLO

A coleta de solo a fim de caracterizar a alteração do perfil do solo quanto aos parâmetros químicos após a aplicação dos corretivos, foi feita no pleno florescimento da cultura da soja, no início de fevereiro de 2018, totalizando 8 meses após aplicação do calcário e P de correção. A coleta de solo se deu por meio de trincheiras, uma em cada parcela, abertas com pá de corte, com 2 subamostras de duas linhas de semeadura, com dimensões de $60 \times 50 \times 50 \text{ cm}$, onde coletou-se o solo nas camadas de 0 - 5, 5 - 10, 10 - 15, 15 - 20, 20 - 25, 25 - 30, 30 - 35 e 35 - 40 cm.

As amostras de solo foram secas em temperatura ambiente até massa constante, moídas, peneiradas em peneira de malha de 2 mm e armazenadas em recipientes plásticos para realização das análises.

4.3 COLETA DE RAÍZES

Foram coletadas raízes da soja para avaliação da distribuição radicular no perfil do solo, bem como observação do comportamento morfológico das raízes frente aos tratamentos. A coleta das raízes se deu no estágio fenológico de pleno florescimento da soja. Coletou-se as seguintes camadas de solo: 0 – 7, 7 – 14, 14 – 21 cm. A primeira camada de solo, 0 – 7 cm, foi estipulada por coincidir com a região de maior teor de P, principalmente nos tratamentos com P aplicado na superfície do solo. Foram coletadas raízes de 3 plantas, correspondendo a 21 cm de linha de semeadura. A largura de coleta foi de 45 cm, ou seja, a distância entre linhas utilizada na semeadura da soja. Foram coletadas 9 porções do sistema radicular: 3 profundidades e 3 porções horizontais, lateral esquerda, centro e lateral direita. A largura entre linhas de 45 cm foi dividida em 3 partes de 15 cm de largura, lateral esquerda, centro e lateral direita, nas 3 profundidades, totalizando 9 porções. Em cada porção de solo, o volume de solo considerado foi de 2205 cm³ (7 cm X 15 cm X 21 cm). Foram realizadas 3 repetições de campo. As amostras foram coletadas juntamente com o solo, armazenadas em sacos plásticos e acondicionadas para separação das raízes.

A separação das raízes das raízes se deu por meio de lavagem. As raízes, juntamente como o solo, foram lavadas com água abundante para retirada total do solo aderido às raízes, em cima de peneira de 1 mm de diâmetro, permitindo a passagem apenas das partículas de solo. Após a lavagem, foi realizado uma seleção manual com pinça para retirada de quaisquer materiais vegetais que não pertenciam ao sistema radicular, incluindo nódulos. As raízes lavadas e limpas, foram acondicionadas em potes plásticos e congeladas para a realização de análises. Realizou-se a medição de comprimento de raízes. As raízes foram scaneadas em scanner apropriado e as imagens processadas com software WinRHIZO para obtenção de parâmetros morfológicos. Para a obtenção do comprimento das raízes laterais, realizou-se a média das porções laterais, esquerda e direita, visando mitigar a variabilidade de campo das plantas situadas nas linhas de semeadura paralelas. A unidade de apresentação das raízes foi a

densidade de raízes, ou seja, cm de raízes por cm³ de solo, através da divisão do comprimento de raízes encontrado na camada de solo pelo volume de solo onde estavam inseridas.

4.4 COLETA E DETERMINAÇÃO DE PRODUÇÃO DE PLANTAS

A estimativa de produção de massa seca da parte aérea da aveia preta foi realizada no estágio fenológico de florescimento, onde coletou-se material vegetal da parte aérea, ao nível do solo, por meio de tesouras de esquila; a área de coleta foi de 10 x 3 m, totalizando 30 m², foi medida a massa do material vegetal verde em campo por meio de balança digital, após separou-se uma amostra de tecido representativa, que foi seca em estufa de circulação de ar forçada a 60 °C até massa constante, para determinação da massa seca.

Na cultura do trigo, devido à alta umidade do ar e geadas intensas que ocorreram na estação de crescimento, houve baixa qualidade de grãos, portanto não se determinou a produtividade de grãos de trigo. Foi estimado a massa seca total da parte aérea do trigo (Mg ha⁻¹), que foi realizada na maturação fisiológica da cultura. Coletou-se 5 linhas de semeadura de trigo, randomicamente em cada parcela, com 5 m de comprimento. Foi feita a pesagem do material no campo e uma amostra significativa foi reservada, seca em estufa de circulação de ar forçado até peso constante e determinada a massa.

Foi realizada a determinação da estatura de plantas de soja, a medição foi feita utilizando uma trena, compreendendo-se do nível do solo até o extremo ponto de crescimento, foram medidas 10 plantas, randomicamente em cada parcela nos estádios fenológicos de pleno florescimento e R2.

A coleta de material para determinação da produtividade de grãos na soja foi realizada na maturação fisiológica da cultura, coletando-se 5 linhas de semeadura, randomicamente na parcela, com 5 m de comprimento, totalizando 11,25 m², foram coletadas plantas inteiras e debulhadas em debulhadora mecânica acoplada em trator agrícola. Foi medida a massa de grãos e determinada a umidade em determinador de umidade eletrônico de bancada para correção da massa de grãos para umidade padrão de 13 %. A massa de mil grãos foi determinada segundo RAS (2019), corrigindo-se a massa a 13 % de umidade.

A coleta de tecido vegetal para determinação de nutrientes na soja foi realizada no estágio fenológico de pleno florescimento, com 10 plantas inteiras, coletadas randomicamente

em cada parcela, secas em estufa à 60 °C até massa constante, moídas, peneiradas em peneira 1 mm e armazenadas em recipientes plásticos para análises. Os grãos da soja foram secos a 60 °C, até massa constante, moídos, peneirados em peneira de malha 1 mm e armazenados em recipientes plásticos para as análises.

4.5 ANÁLISES LABORATORIAIS

O teor de P e K no solo foram extraídos por meio de solução ácida clorídrica-sulfúrica Mehlich-1; Ca, Mg e Al, com extrator KCl 1 M, todos segundo metodologia de Tedesco (1995). O P foi determinado em espectrofotômetro Beckman de UV visível segundo metodologia de Murphy & Riley (1962); o K foi determinado em fotômetro de emissão de chama Digimed; Ca e Mg foram determinados por espectroscopia de absorção atômica e Al foi titulado conforme metodologia de Tedesco (1995). O pH em água do solo foi medido em pHmetro digital PoliControl - pH 250, com proporção de solo/água de 1:1 e a acidez potencial determinada com solução TSM (TOLEDO), segundo metodologia de TEDESCO e cálculo da acidez potencial, segundo KAMINSKI.

Os teores de P, K, Ca, Mg e N total no tecido e grão da soja foram extraídos através de digestão sulfúrica do tecido vegetal segundo metodologia de Tedesco (1995). P, K, Ca e Mg determinados nos equipamentos e métodos anteriormente descritos e N total determinado em destilador Tecnal e titulado, segundo metodologia de TEDESCO (1995).

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise da variância foi feita considerando experimento bifatorial com parcelas subdivididas. Quando significativo, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey com nível de significância de $p < 0,10$ para parâmetros de planta, e $p < 0,05$ para parâmetros de solo. O programa utilizado foi o Sisvar.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

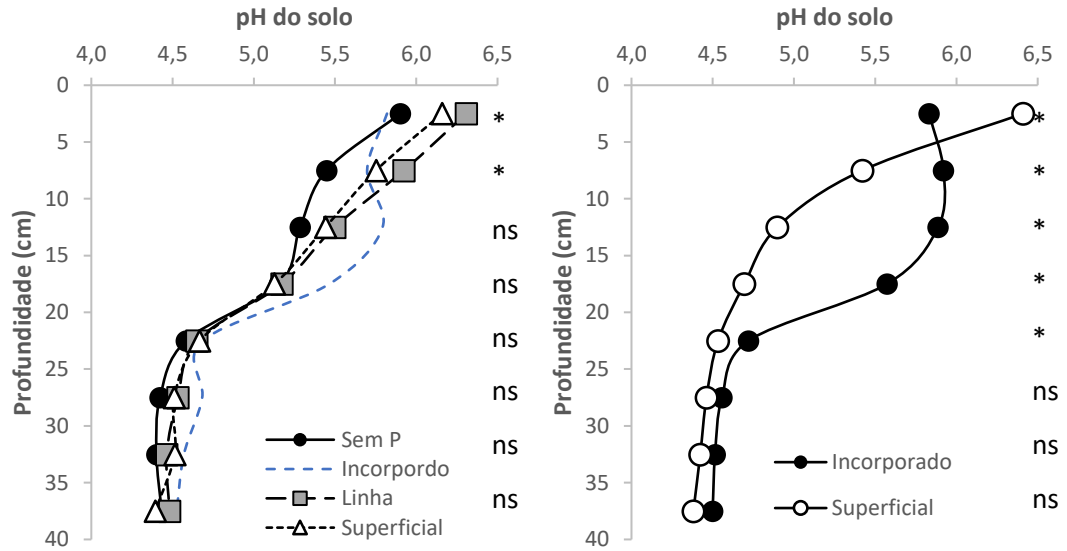
5.1 ACIDEZ DO SOLO

Nas Figuras 8, 9 e 10 é possível observar o pH do solo, saturação por Al e acidez potencial até 40 cm de profundidade com aplicação de calcário incorporado e superficial. A aplicação de calcário incorporado ao solo proporcionou pH do solo estatisticamente superior até a camada de solo de 20 – 25 cm, em comparação com aplicação de calcário superficial (Figura 8).

O pH médio da camada de solo de 0 – 20 cm no calcário incorporado foi de 5,8, enquanto no calcário superficial foi de 5,35 (Figura 8). Na camada de solo de 10 – 15 cm o pH do solo com aplicação de calcário superficial foi próximo a 5,0, enquanto com aplicação de calcário incorporado ao solo foi de pH próximo a 6,0. A aplicação de calcário incorporado apresentou pH do solo relativamente homogêneo até 20 cm de profundidade, já o calcário superficial apresentou heterogeneidade de pH no perfil do solo.

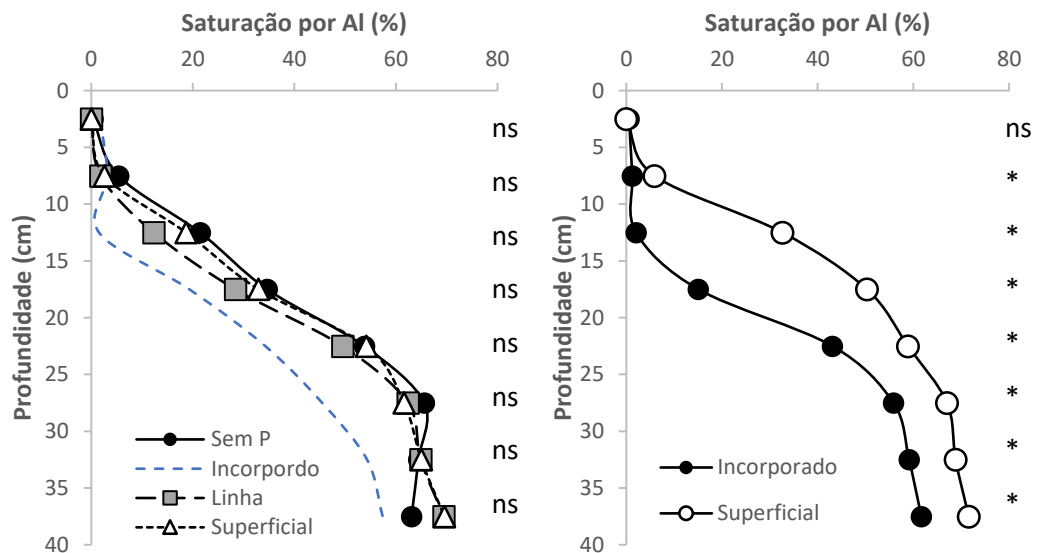
A incorporação de calcário apresentou menor saturação por Al em todo o perfil de solo até 40 cm de profundidade, apresentando 15% na camada de solo de 15 – 20 cm enquanto o calcário superficial apresentou 50% (Figura 9). Da mesma forma a acidez potencial com calcário incorporado apresentou-se menor até os 40 cm de profundidade no perfil do solo (Figura 10).

Figura 8 – pH no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e pH do solo conforme o modo de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).



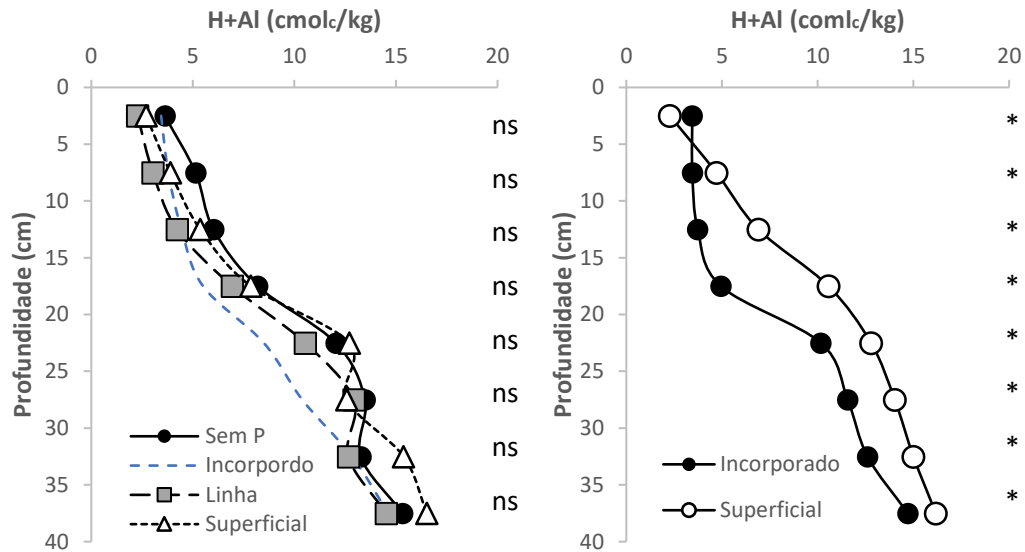
(*) Significativo a Tukey $p < 0,05$. (ns) Não significativo a Tukey $p < 0,05$.

Figura 9 – Saturação por alumínio no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).



(*) Significativo a Tukey $p < 0,05$. (ns) Não significativo a Tukey $p < 0,05$.

Figura 10 – Acidez potencial (H+Al) no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).



(*) Significativo a Tukey $p < 0,05$. (ns) Não significativo a Tukey $p < 0,05$.

Os resultados de correção da acidez do solo, com o tempo de avaliação, corroboram com Kaminski (2005), Rheiheimer (2000), Caires (2005) e Cassiolato (2000) e evidenciam a baixa capacidade de neutralização da acidez do solo em camadas de solo mais profundas com aplicação de calcário na superfície do solo, principalmente em curto espaço de tempo (8 meses), mesmo em um Argissolo, com 20 % de argila no horizonte A, baixa MO e baixa acidez potencial. Os resultados apresentados nas Figuras 8, 9 e 10 mostram boa homogeneização do calcário no perfil do solo com a incorporação do calcário através de duas arações e uma gradagem, salientando a importância de uma distribuição homogênea na camada de solo considerada e corroboram com Prado (2003), que observou melhores resultados de incorporação do calcário com ações mecânicas pesadas.

A incorporação do calcário elevou o pH do solo, diminuiu a saturação por Al e a acidez potencial, em todo o perfil aplicado aos níveis almejados, em apenas 8 meses, mesmo sendo conhecida a baixa solubilidade do calcário, isso se deve ao fato da incorporação de calcário maximizar a área superficial do calcário em contato com o solo, maior exposição a atividade biológica e exposição a ambiente de maior umidade, favorecendo a solubilização do calcário (DUMALE JR, 2011; GALLO & CATANI, 1954).

A ação de neutralização da acidez do solo em camadas de solo mais profundas, pela aplicação de calcário superficial, depende de uma série de fatores físicos, químicos e biológicos e via de regra ocorre de forma lenta (CALEGARI, 2013; CAIRES, 1998), pois é necessária a neutralização da acidez na camada de solo onde se aplicou o calcário para que haja um avanço da frente alcalinizante, através dos íons HCO_3^- e OH^- , no perfil do solo (RHEINHEIMER, 2000), além disso, os íons neutralizadores da acidez também apresentam reação com cátions como Al^{3+} , Mn^{2+} e Fe^{2+} , retardando o movimento vertical do calcário no perfil do solo (CAIRES, 2005; RHEINHEIMER, 2000).

É possível que com a aplicação de calcário superficial, haja predomínio da percolação de Ca e Mg no perfil do solo em relação a HCO_3^- e OH^- . Este fenômeno pode favorecer o fenômeno de troca de ligantes de Ca e Mg por H e Al adsorvido nos grupos funcionais dos minerais, deslocando-os para a solução do solo e aumentando a acidez do solo devido ao aumento da concentração de H^+ na solução do solo e liberação de H^+ como produto das reações de hidrólise do Al^{3+} (ERNANI, 2004). A reacidificação do solo ocorre de forma extremamente lenta, evidenciado por Rheinheimer (2018), onde após 24 anos de aplicação de calcário, o solo não retornou à condição de acidez natural, pois a velocidade de dissociação dos íons complexados não ocorre com a mesma intensidade da reação de neutralização.

A incorporação do calcário apresenta maior custo operacional (CAIRES, 2005), porém promoveu a correção da acidez do solo em todo o perfil aplicado, diminuindo drasticamente a acidez potencial do solo e precipitando o Al trivalente em formas cristalinas, o que proporciona controle da acidez do solo e Al tóxico por longo tempo e em camadas de solo profundas, em solos manejados sob SPD.

Uma vez corrigida a acidez do solo pela incorporação de calcário, a acidez potencial do solo na camada de solo de 0 – 20 cm reduz drasticamente, o que favorece, posteriormente, a ação de neutralização com aplicação de calcário superficial em camadas de solo mais profundas, favorecendo a migração dos íons HCO_3^- e OH^- em subsuperfície (RHEINHEIMER, 2000) pela diminuição da acidez potencial do solo. Partindo deste princípio, a aplicação de calcário superficial é um ótimo recurso de controle da acidez do solo em SPD consolidado em solos já corrigidos, preservando a estrutura do solo e os benefícios do não revolvimento, porém como método de correção da acidez em solos extremamente ácidos e/ou que nunca incorporou-se calcário, possui limitação (CALEGARI, 2013) e necessita aplicação de altas doses e longo tempo para correção efetiva da acidez do solo em profundidade.

Além das limitações da correção da acidez subsuperficial do solo, a aplicação de calcário superficial está sujeita ao transporte de partículas de calcário e íons neutralizadores da acidez pela erosão superficial do solo, principalmente em altas taxas de aplicação, fenômeno ao qual dificilmente é considerado em condição experimental, e ocorre com frequência no período de entressafra da cultura da soja onde o solo permanece sem cobertura vegetal e com alta umidade do solo no período de outono-inverno no sul do Brasil, sendo agravado em regiões com relevo ondulado.

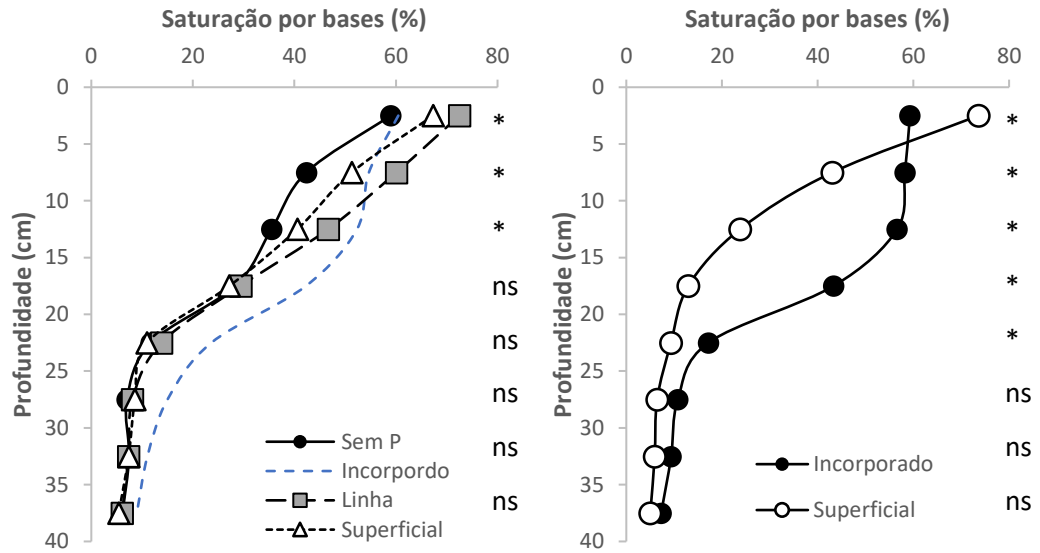
5.2 SATURAÇÃO POR BASES E TEORES DE CÁLCIO E MAGNÉSIO NO SOLO

Nas Figuras 11, 12 e 13, são apresentados os resultados de saturação por bases e teores de Ca e Mg no perfil do solo até 40 cm de profundidade.

A saturação por bases apresentou o mesmo comportamento do pH do solo, havendo maior saturação por bases na condição de calcário incorporado até a camada de solo de 20 - 25 cm (Figura 11).

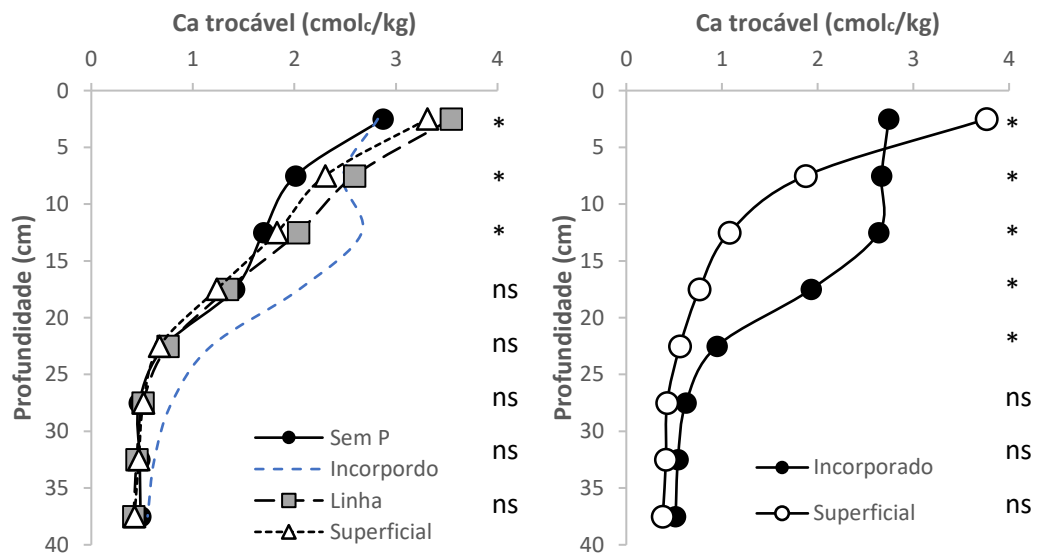
Na condição de calcário incorporado, os teores de Ca e Mg trocáveis foram maiores que calcário superficial até a camada de solo de 20 - 25 cm, apresentando uma distribuição relativamente homogênea nesta camada de solo (Figura 12 e 13). A aplicação de calcário superficial, na camada de solo 0 - 5 cm, apresentou o maior teor de Ca e Mg. No calcário incorporado, o aumento dos teores de Ca e Mg e a redução da acidez potencial até a camada de solo de 20 - 25 cm, permitiu elevação na saturação por bases em comparação a calcário superficial que apresentou menor teor de Ca e Mg e maior acidez potencial até a camada de solo de 20 - 25 cm.

Figura 11 - Saturação por bases no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).



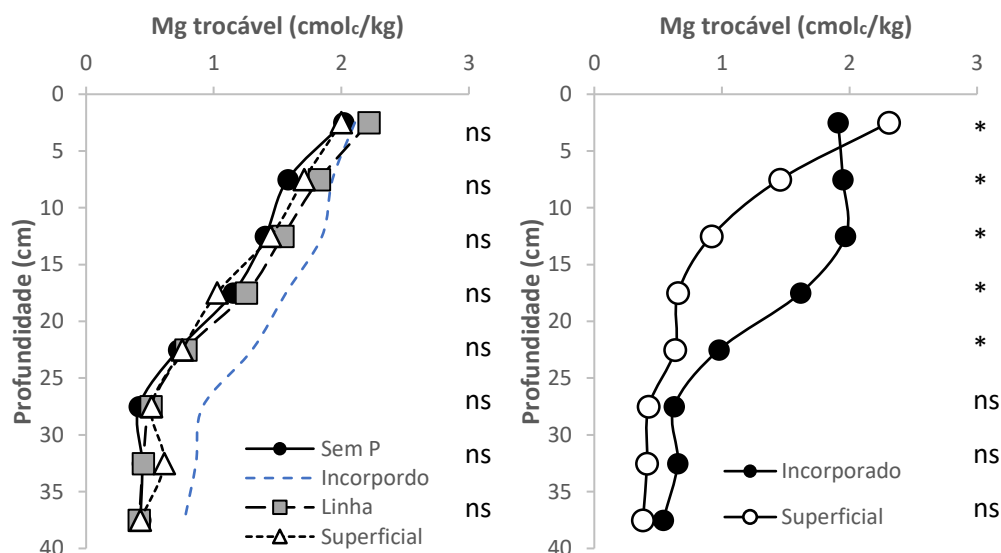
(*) Significativo a Tukey $p < 0,05$. (ns) Não significativo a Tukey $p < 0,05$.

Figura 12 – Teor de Ca trocável no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).



(*) Significativo a Tukey $p < 0,05$. (ns) Não significativo a Tukey $p < 0,05$.

Figura 13 – Teor de Mg trocável no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).



(*) Significativo a Tukey $p < 0,05$. (ns) Não significativo a Tukey $p < 0,05$.

Estes resultados obtidos sob calagem superficial, corroboram com Caires (2005), que, com aplicação de calcário superficial, na camada de solo de 10 – 20 cm, o aumento do teor Ca foi observado apenas após 2,5 anos após a aplicação do calcário e o teor de Mg após 2,5 - 5 anos após a aplicação. Segundo a CQFS (2016), os teores de Ca e Mg no solo acima de 2,0 e 0,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, são considerados suficientes para obtenção de boa produtividade em culturas de grãos. A aplicação de calcário incorporado apresentou teor de Ca igual ou superior a 2,0 até 20 cm de profundidade, enquanto na condição de calcário superficial este critério foi satisfeito apenas na camada de solo de 0 – 5 cm (Figura 13).

A aplicação de calcário superficial, principalmente nos primeiros 5 cm do perfil do solo, elevou o pH do solo acima de 6,0, bem como o teor de Ca a 4,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. A movimentação e aproximação do Ca para a zona rizosférica, se dá, predominantemente, por meio de fluxo de massa (MARSCHNER, 2012, p. 317), podendo haver acúmulo excessivo destes nutrientes na região próxima às raízes e formando precipitados de Ca na superfície radicular (MALZER & BARBER, 1975; MOODY, 1995). A absorção e aproximação dos nutrientes às raízes ocorre devido a criação de uma zona de depleção dos nutrientes na região rizosférica e também sofre interferências da diferença de potencial elétrico (MARSCHNER, 2012, p. 316), assim, o acúmulo de Ca na rizosfera aumenta a concentração de Ca e torna a

região com predominância de cargas positivas, o que dificulta a aproximação e absorção de outros cátions, bem como do próprio Ca (MALZER, 1975). A distribuição homogênea e com teor equilibrado de Ca no perfil do solo, alcançado pela aplicação de calcário incorporado, pode mitigar a precipitação do Ca na superfície radicular e favorecer a absorção pelas raízes, por apresentar teor de Ca equilibrado e homogêneo no perfil do solo.

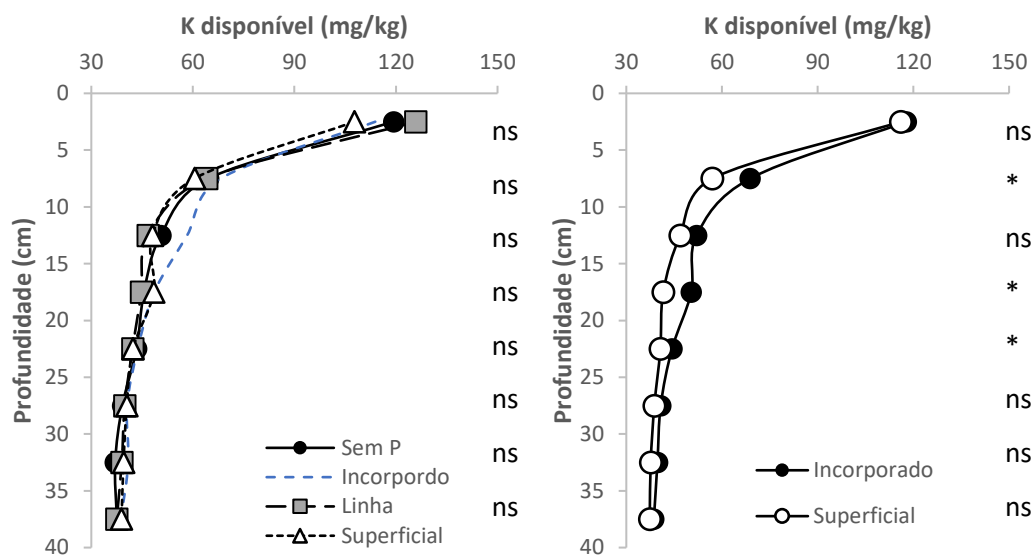
A incorporação do calcário permitiu a deposição de Ca e Mg em subsuperfície e de forma homogênea na camada de solo de 0 – 20 cm, ao contrário da calagem superficial que depende da percolação dos elementos no perfil do solo, o que ocorre de forma lenta e é afetado por diversos fatores (RHEINHEIMER, 2000; KAMINSKI, 2005; CAIRES, 1998). A absorção de Ca e Mg se dá, predominantemente, pelo fenômeno de fluxo de massa, ou seja, em meio aquoso, e o Ca apresenta baixa mobilidade no floema (MARSCHNER, 202), portando, maiores teores de Ca e Mg em subsuperfície podem garantir uma estabilidade de fornecimento destes nutrientes as plantas em condições de restrição hídrica e diminuição na umidade do solo nos primeiros 10 cm de profundidade, além de diminuir a atividade iônica do Al tóxico às plantas em subsuperfície (ERNANI, 2004).

Pela dose de calcário aplicada e o pH do solo almejado (6,0), segundo a CQFS (2016), esperava-se a elevação da saturação por bases à 80 %, o que não ocorreu em ambas formas de aplicação do calcário. A elevação do pH a 6,0, até cerca de 20 cm de profundidade no calcário incorporado, torna a superfície dos minerais com predominância de cargas negativas, pela modificação dos grupos funcionais dos minerais de cargas variáveis que são deprotonados (BARROW, 1999; ERNANI, 2004), o que favorece a adsorção do Ca e Mg e intensifica a energia de ligação com a fase mineral do solo, este fator leva a diminuição do Ca e Mg trocável, diminuindo a saturação por bases (SUMNER, 1978). É provável que com o passar do tempo, com avanço da neutralização da acidez do solo e solubilização de partículas grosseiras do calcário, a saturação por bases e os teores de Ca e Mg sejam elevados em ambas formas de aplicação. A modificação dos grupos funcionais dos minerais de cargas variáveis do solo pela elevação do pH pode ser benéfica por aumentar a adsorção de cátions nos grupos funcionais dos minerais e retardar a lixiviação de bases no perfil do solo extrapolando a zona de exploração efetiva das raízes.

5.3 POTÁSSIO

A incorporação de calcário apresentou maior teor de K nas camadas de solo de 5 – 10 cm, 15 – 20 cm e 20 – 25 cm, em comparação ao calcário superficial (Figura 14).

Figura 14 – Teor de potássio trocável no perfil do solo com aplicação de calcário superficial e incorporado (à direita), e nos modos de aplicação de P com calcário incorporado (à esquerda).



(*) Significativo a Tukey $p < 0,05$. (ns) Não significativo a Tukey $p < 0,05$.

O calcário incorporado apresentou pH do solo superior ao calcário superficial, o que condiciona uma deprotonação dos grupos funcionais dos argilominerais e óxidos, tornando a superfície mais negativa (BARROW, 1999), este fenômeno favorece a adsorção de cátions como o K, levando a uma diminuição do K trocável, porém os resultados expressos na Figura 15 não mostraram esse comportamento. A incorporação do calcário elevou os teores de Ca e Mg até a camada de solo de 20 – 25 cm, em comparação ao calcário superficial. A maior presença de Ca e Mg, que são cátions divalentes, aumenta a competição dos cátions pelos grupos funcionais dos minerais e da MOS, e favorece o fenômeno de troca de ligantes com o K monovalente adsorvido, sendo o K desorvido para a solução do solo, em pequena proporção, e predominantemente fazendo reações de menor energia com os minerais e MOS, o que favorece a desorção deste elemento frente a diminuição de concentração de K na

solução do solo e troca de ligantes com outros cátions. A mobilização do solo e restos vegetais da superfície do solo, pela ação de incorporação do calcário, também redistribuiu o K no perfil do solo, uma vez que a camada de solo superficial apresenta maior teor de K, elevando o teor de K em camadas de solo mais profundas.

O teor crítico de K para culturas de grãos, segundo CQFS (2016), é de 90 mg kg^{-1} , e foi atingido apenas na camada de solo de 0 – 5 cm em todos os tratamentos. É possível observar o comportamento imóvel do K no perfil do solo, mesmo em um Argissolo com baixo teor de argila, sendo a adsorção favorecida pela elevação do pH do solo pela calagem. Apesar do teor crítico de K sendo satisfeito apenas na camada de solo de 0 – 5 cm, a produtividade de grãos de soja foi elevada nos tratamentos T1 e T2, com produtividade de grãos próxima a 6 t/ha, indicando não ter havido limitação de nutrição deste nutriente. Há relatos na literatura sobre superestimação do teor de K no solo suficiente para produtividade de grãos de soja e demais culturas de grãos, como relatado por Brunetto (2005) e Rheinheimer (2001 apud BRUNETTO, 2005), observando baixo incremento de produtividade de grãos com aumento da dose e teor de K no solo.

5.4 FÓSFORO NO SOLO

O teor de P Melich⁻¹ no solo, nos tratamentos conduzidos sob calcário incorporado é apresentado na Figura 15.

O tratamento T1 apresentou distribuição homogênea de P no perfil do solo até a camada de solo de 10 – 15 cm, com teor de P de cerca de 20 mg kg^{-1} de solo. Na camada de solo de 15 -20 cm, o tratamento T1 apresentou teor de P de 14 mg kg^{-1} , enquanto T2, T4 apresentaram teor de P igual a testemunha, de 4 mg kg^{-1} . Os resultados obtidos evidenciam boa correlação da dose de P estipulada segundo a CQFS (2016), com o teor de P Melich⁻¹ almejado, que foi de 18 mg kg^{-1} , e a boa homogeneidade de distribuição do fertilizante no perfil do solo através das operações de duas arações e uma gradagem.

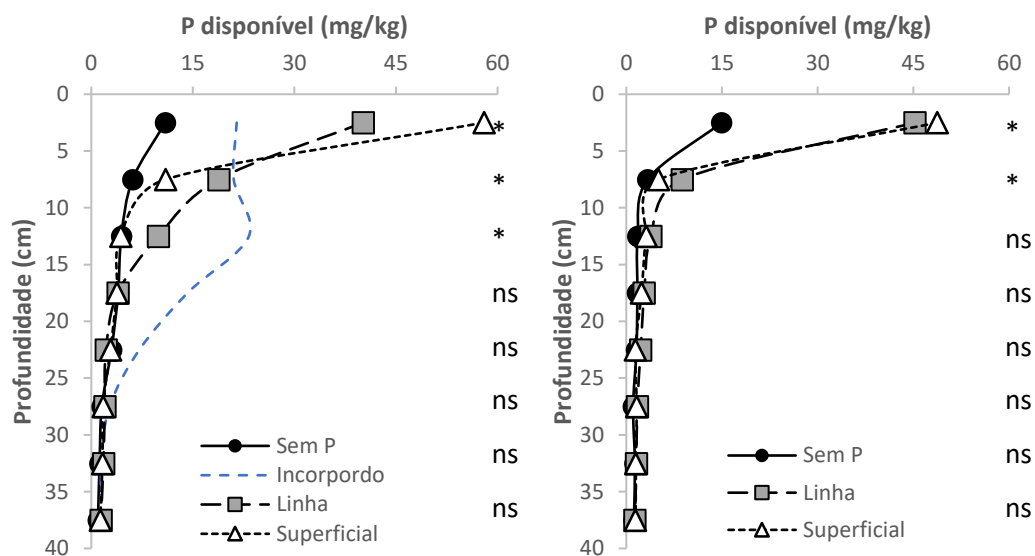
O tratamento T4 apresentou o maior teor de P na camada de solo de 0 – 5 cm, atingindo 58 mg kg^{-1} de solo, enquanto o tratamento T2 apresentou teor de P de 40 mg kg^{-1} de solo e T1 21 mg kg^{-1} de solo. O incremento do teor de P no solo limitou-se a região de deposição do fertilizante fosfatado. Observa-se na Figura 16 que o teor crítico de P no solo foi

satisfeito nos tratamentos T1, T2 e T4 até a profundidade de 15 cm, 10 cm e 5 cm, respectivamente.

Na Figura 15 (à direita) o teor de P Mg^{-1} no solo, nos tratamentos conduzidos sob calcário superficial são demonstrados. Na camada de solo de 0 – 5 cm, os tratamentos T3 e T5 apresentaram teor de P de cerca de 45 mg kg^{-1} . Na camada de solo de 5 – 10 cm, o tratamento T3 apresentou teor de P de 9 mg kg^{-1} , enquanto o tratamento T5 apresentou 5 mg kg^{-1} , próximo a testemunha que apresentou 3 mg kg^{-1} . Abaixo da camada de solo de 5 – 10 cm, o teor de P no solo foi igual em todos tratamentos. O teor crítico de P no solo, estipulado pela CQFS (2016) foi satisfeito apenas na camada de solo de 0 – 5 cm nos tratamentos T3 e T5.

Os teores de P no solo, nos tratamentos com calagem superficial (Figura 15 à direita) apresentaram elevação apenas na camada de solo de 0 – 5 cm, apresentando nas camadas de solo subjacentes, teor de P próximo à testemunha; ao contrário dos tratamentos com aplicação de P sob calagem incorporada ao solo, que apresentaram maior teor de P até cerca de 15 cm de profundidade, em comparação com o mesmo modo de aplicação de P sob calagem superficial. Mesmo na camada de solo de 0 – 5 cm, a incorporação de calcário permitiu maior teor de P quando o P foi aplicado na superfície do solo (T4), em comparação com aplicação de P e calcário na superfície (T5). A aplicação de P na linha de semeadura apresentou grande diferença de teor de P na camada de solo de 5 – 10 cm conforme o modo de aplicação de calcário, tratamentos T2 e T3.

Figura 15 – Teor de fósforo no perfil do solo conforme o modo de aplicação de fósforo, com calcário incorporado (à esquerda) e calcário superficial (à direita).



(*) Significativo a Tukey $p < 0,05$. (ns) Não significativo a Tukey $p < 0,05$.

Nos tratamentos com aplicação superficial de P, é possível observar o comportamento imóvel do íon fosfato no perfil do solo, apresentando teor de P suficiente apenas na camada de solo de 0 – 5 cm. O comportamento de mobilidade do íon fosfato em solos com baixo teor de argila e MOS, frequentemente é questionado em trabalhos científicos e no ambiente acadêmico. Na condição deste experimento foi aplicado uma dose acumulada de 280 kg de P equivalente P_2O_5 /ha ou 622 kg/ha de superfosfato triplo, em um intervalo de tempo de 18 meses; mesmo nestas circunstâncias não houve elevação do teor de P na camada de solo de 5 – 10 cm, ressaltando a importância da aplicação de P em camadas de solo mais profundas, principalmente via aplicação na linha de semeadura.

É frequente, em trabalhos de assessoria agrícola, realizar amostragem de solo em camadas de solo mais profundas, como 0 – 15 cm e 0 – 20 cm, para monitoramento do teor de P no solo, porém a correção do teor de P recomendada, é aplicada superficialmente no solo. Devido ao comportamento imóvel do P no solo, observado na Figura 15, a elevação do teor de P se dará apenas na superfície do solo, não havendo melhora na aquisição de P pelas plantas, portando apresentando pequena resposta produtiva e com grande potencial de perdas por erosão superficial.

No tratamento com incorporação de P e calcário, observou-se elevação do teor de P no solo até o teor crítico almejado de 18 mg kg⁻¹. Devido as condições de acidez do solo no evento da incorporação de P, esperava-se maior adsorção do fertilizante fosfatado pelos grupos funcionais do solo em camadas de solo mais profundas, o que não ocorreu, indicando potencial emprego desta prática juntamente com a incorporação de calcário em solos com baixa acidez potencial e baixo teor de argila.

A absorção de fosfato pelas raízes apresenta algumas limitações: (1) aproximação do fosfato para a zona rizosférica e absorção pelas raízes se dá por meio de difusão (GRANT, 2001), que é um mecanismo menos eficiente quantitativamente que o fluxo de massa (MARSCHNER, 2012, p. 317); (2) a difusão e absorção de P pelas raízes depende de boa umidade do solo (GRANT, 2001); (3) o coeficiente de difusão do P no solo é baixo (NEUMANN & RÖMHELD, 2011); (4) a intensidade de adsorção e absorção do fosfato aplicado depende do pH do meio (TUCHER, 2018; SAUNDERS, 1958); (5) a dessorção de P e/ou a capacidade tamponante do P no solo para solução depende do fator quantidade (adsorvido nos grupos funcionais) (NOVAIS, 2007); (6) a concentração de fosfato na solução do solo via de regra é baixa e a absorção depende do pH da solução do solo (HENDRIX, 1967 apud MARSCHNER, 2012, p. 22); (7) em solos conduzidos sob SPD com aplicação de fosfato na superfície do solo, via de regra, o P encontra-se, em níveis suficientes apenas na camada de solo de 0 – 5 cm, em um volume de solo restrito (CALEGARI, 2013); (8) a erosão superficial do solo transporta partículas minerais e orgânicas de solo rico em P e outros nutrientes (CALEGARI, 2013; CAPOANE, 2015), diminuindo o teor de P na superfície do solo; (9) a camada de solo superficial apresenta alta amplitude de umidade sendo onde ocorre a maior perda de água devido a evapotranspiração e a incidência de radiação (SCHWARTZ, 2010 apud HANSEL, 2017); (10) as raízes das plantas ocupam menos 5% do volume de solo onde estão inseridas (ANGHINONI & BARBER, 1980 apud BORKERT & BARBER, 1985). Estes fatores indicam a vulnerabilidade a perda do P na camada superficial do solo e severas restrições a absorção de P pelas raízes na camada de solo de 0 – 5 cm, o que ocorreu nos tratamentos com aplicação de P superficialmente, principalmente em áreas não irrigadas e frente a estiagens no período de crescimento da soja. Por isso, o manejo da adubação fosfatada e a manipulação das variáveis que restringem a absorção deste nutriente são de grande importância, frente a boa resposta produtiva da cultura da soja à adubação fosfatada e ao alto custo deste nutriente na agricultura.

O teor crítico de P no solo, estipulado e calibrado pela CQFS (2016) para culturas de grãos, segundo o teor de argila do solo, é de 18 mg kg^{-1} . A boa distribuição de P passível de dessorção no perfil do solo e em teor próximo ou acima ao teor crítico calibrado, é um fator de maximização de exposição das raízes a um solo rico em P, favorecendo a absorção pelas plantas (BRAY, 1954), o que ocorreu com incorporação e aplicação na linha de semeadura de P e calcário. A maior parte das raízes encontra-se na camada de solo superficial, como observado neste trabalho, onde 50 – 60 % do comprimento total das raízes da soja (0 – 21 cm) encontrava-se na camada de solo de 0 – 7 cm, o que é um recurso eficiente da planta para obtenção de P, que via de regra encontra-se na superfície do solo devido a ciclagem natural do P no solo (WANG, 2010), porém existem restrições na absorção de P nos primeiros centímetros do perfil do solo, principalmente em virtude de restrição hídrica que desfavorece a aproximação e movimentação do íon fosfato à superfície radicular. É importante salientar que a absorção de nutrientes pela raiz não se dá em sua total área superficial, ou seja, pequena parcela das raízes são capazes de absorver P, e ocorre nas extremidades radiculares em raízes finas (MARSCHNER, 2012, p. 346), bem como ocorre emissão de raízes superficiais em zonas já depletadas em P por outras raízes, portanto a absorção não é diretamente proporcional ao comprimento de raízes (WALK, 2004).

A distribuição homogênea de P no perfil de solo onde há exploração radicular pode melhorar a absorção de P pelas raízes, pela maior superfície de contato com P (SCHJORRING & NIELSEN, 1987 apud GAHOONIA, 1997) e em condições de restrição de umidade do solo na camada de solo de 0 – 5 cm. A melhor distribuição de P no perfil do solo, especialmente na cultura da soja, favorece a FBN, pois o P é um nutriente que limita o crescimento e atividade dos microrganismos fixadores de N (SLATTERY, 2001; MOHAMMADI, 2012). Além do P, o pH do solo também influencia diretamente a FBN, sendo diminuída a medida de se reduz o pH do solo (SLATTERY, 2001), portanto a melhor condição para a FBN pode ser encontrada nos tratamentos T1 e T2.

Solos conduzidos sob SPD consolidado por longo tempo, em geral, apresentam teores dos principais macronutrientes (Ca, Mg, K e S) em níveis suficientes no perfil de solo que é explorado pelas raízes, porém esse comportamento não costuma acontecer com o P, que limita-se aos primeiros centímetros no perfil do solo; partindo desta premissa, o P se torna o nutriente mais limitante para obtenção de alta produtividade na cultura da soja e potencialmente a FBN, e aumentar o volume de P rico em P pode ser um fator de melhoria na

absorção de P (SCHJORRING & NIELSEN, 1987 apud GAHOONIA, 1997) e consequente incremento de produtividade.

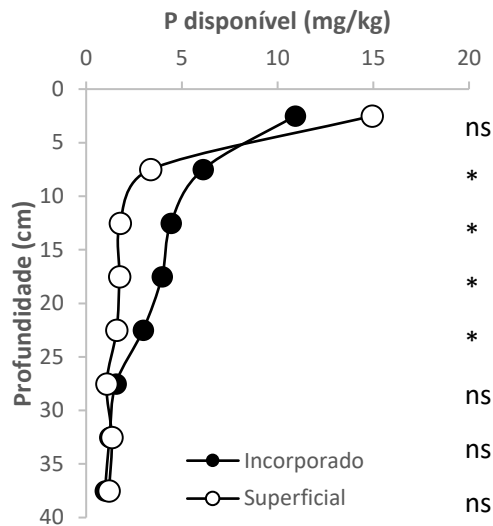
Na condição de calcário superficial, nos tratamentos T5 e T3, observa-se que o teor de P acima do teor crítico é encontrado apenas na camada de solo de 0- 5 cm, 2,5 vezes superior ao teor crítico. A aplicação de P na linha de semeadura, com calcário superficial, não foi capaz de incrementar P na camada de solo de 5 – 10 cm, o que pode ter ocorrido pelo fato do baixo pH do solo nesta camada, que se encontrava abaixo de 5,5, intensificando a formação de ligações químicas P-Fe e P-Al mais energéticas, bem como a característica imóvel do fosfato no perfil do solo (TUCHER , 2018). O fator quantidade de P, ou seja, adsorvido nos grupos funcionais e passível de dessorção, tem forte relação com a taxa de dessorção e concentração na solução do solo (NOVAIS, 2007), o que pode melhorar a absorção de P pelas raízes na superfície do solo, porém as diversas limitações à absorção de P na camada de solo de 0 – 5 cm incidem com a mesma intensidade.

A aplicação de P superficial com calcário superficial, além de limitar o volume de solo rico em P que é explorado pelas raízes, é depositado em uma localização do solo muito peculiar, altamente dinâmico e exposto a potenciais perdas, com um pH elevado e alta concentração de nutrientes e íons, em especial o Ca e Mg. A atividade do fosfato na solução do solo é condição de grande relevância para a absorção de P na solução do solo pelas raízes, sendo fortemente reduzida frente a presença de outros íons e compostos de carbono (NOVAIS, 2007), sendo esta condição desfavorável encontrada com a aplicação de P na superfície. A alta concentração de Ca na superfície do solo, devido a aplicação de calcário superficial, favorece a formação de precipitados de P, como o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, os quais não são absorvidos pelas raízes e dependem de solubilização (MALZER, 1975; MOODY, 2015).

Estes resultados indicam forte influência dos íons derivados do calcário e da elevação do pH, na disponibilidade e nas espécies químicas de P no solo. Moody (1995) relata em seu estudo a intensificação de formação de complexos de P-Ca, na forma de $\text{CaHP0}_4.2\text{H}_2\text{O}$, à medida que se eleva o pH e a concentração de Ca na solução do solo. Este fato explica o menor teor de P na superfície do solo com aplicação de calcário superficial.

Na Figura 16 é apresentado a comparação do teor de P no solo, nos tratamentos sem adição de P, de acordo com o modo de aplicação do calcário.

Figura 16 – Teor de fósforo no perfil do solo com incorporação de calcário e aplicação superficial.



(*) Significativo a Tukey $p < 0,05$. (ns) Não significativo a Tukey $p < 0,05$.

Na camada de solo de 0 – 5 cm não houve diferença estatística no teor de P em ambos os tratamentos. Nos tratamentos sem aplicação de P, a aplicação de calcário incorporada ao solo, T6, apresentou maior teor de P no solo em comparação a aplicação de calcário superficial, T7, na camada de solo de 5 – 10 cm até 20 – 25 cm. O incremento de P no solo até 25 cm de profundidade se deve ao fato da incorporação e homogeneização do solo superficial com maior teor de P em formas orgânicas e inorgânicas, bem como de restos vegetais, através da operação de incorporação de calcário, que redistribuiu P e resíduos orgânicos no perfil do solo. O maior teor de P no solo, sob calagem incorporada, observado na Figura 16, não pode ser atribuído a elevação de pH em subsuperfície, favorecendo dessorção de P, como ressaltado por Barrow (2016) que relata que a elevação do pH do solo não favorece a dessorção de P.

5.5 DADOS DE PRODUÇÃO DE SOJA, AVEIA E TRIGO

Os dados de produtividade de grãos de soja, estatura de plantas e massa de mil grãos, são demonstrados nas Figuras 17 a 21.

Na condição de calcário incorporado, os tratamentos com incorporação de P e aplicação na linha de semeadura obtiveram as maiores produtividades de grãos de soja, com 5615 kg ha⁻¹ e 5476 kg ha⁻¹, respectivamente, seguido de 4480 kg ha⁻¹ no tratamento T4 e 4076 kg ha⁻¹ no tratamento sem P (Figura 17). Nos tratamentos com aplicação de calcário superficial, a maior produtividade de grãos de soja foi obtida no tratamento T3 com 4362 kg ha⁻¹, seguido de 3906 kg ha⁻¹ no tratamento T5 e 3427 kg ha⁻¹ no tratamento sem P.

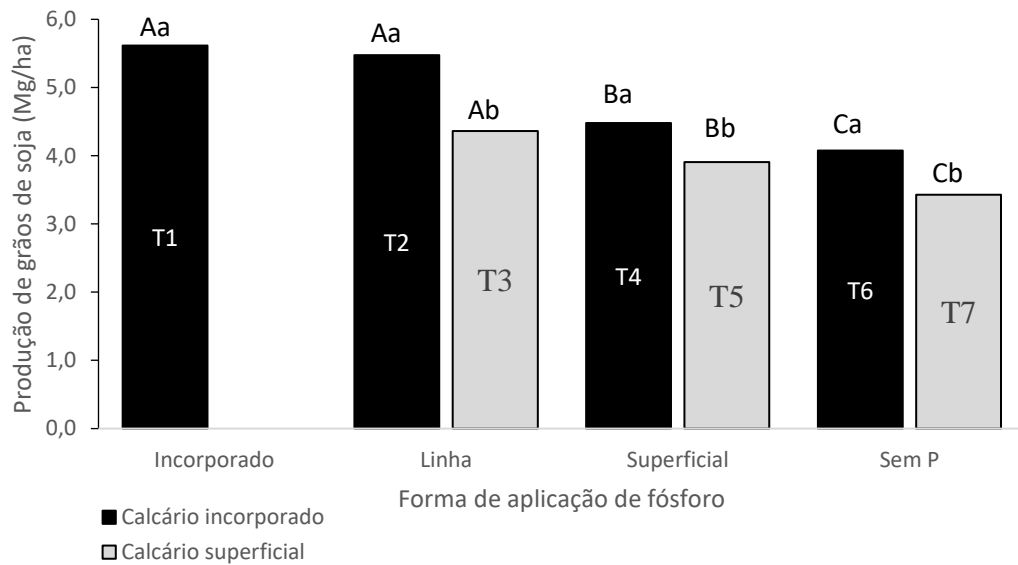
O modo de aplicação de calcário afetou a produtividade de grãos de soja em todos os modos de aplicação de P, sendo os melhores resultados obtidos com incorporação de calcário (Figura 17). Com aplicação do P na linha de semeadura, na superfície do solo e sem P, houve aumento de produtividade de grãos, em relação ao mesmo modo de aplicação de P na condição de calcário superficial, de 25 %, 15 % e 20 %, respectivamente.

Nos tratamentos com calcário incorporado, a aplicação de P na linha de semeadura e na superfície do solo resultaram em redução de produtividade de grãos de 2 % e 20 %, respectivamente, em comparação com a incorporação de P (Figura 18). Já, nos tratamentos com aplicação de calcário superficial, a aplicação de P na linha de semeadura e na superfície do solo, resultaram em redução de produtividade de grãos de 22 % e 30 %, respectivamente, em comparação com a incorporação de P (Figura 18).

A estatura de plantas da soja no estágio fenológico R.2, apresentou o mesmo comportamento da produtividade de grãos de soja, sendo a maior estatura de plantas obtida nos tratamentos T1 e T2 (Figura 20). A incorporação de calcário proporcionou maior estatura de planta em todos os modos de aplicação de P em comparação a aplicação superficial de calcário.

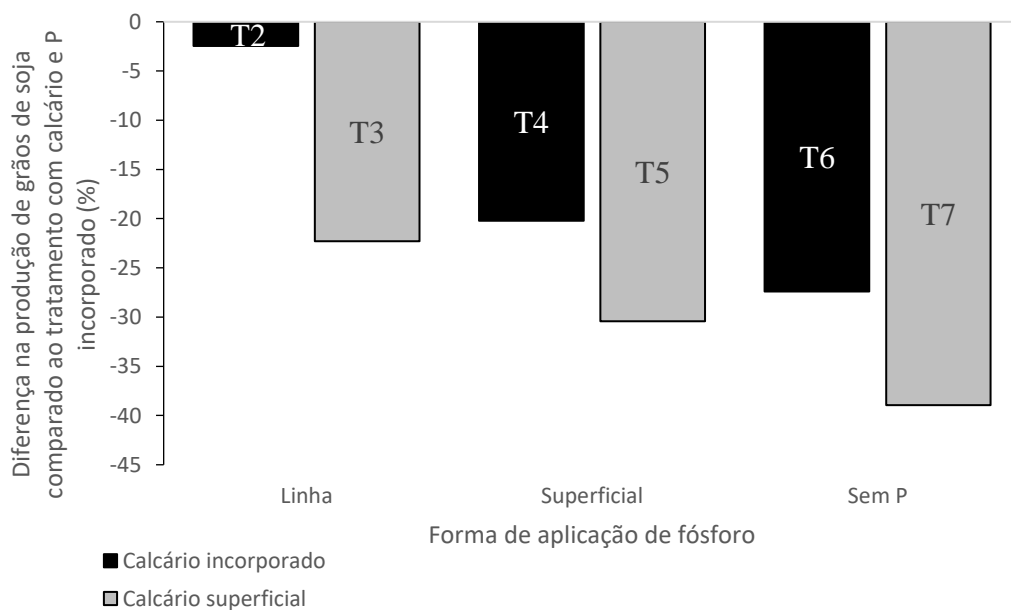
A massa de mil grãos da soja apresentou os maiores valores na condição de incorporação de calcário e aplicação de P na incorporado e na linha de semeadura (Figura 21). Não houve diferença estatística na massa de mil grãos entre os tratamentos T3 e T5, bem como entre T4 e T6. A incorporação de calcário, em comparação a aplicação superficial, apresentou maiores valores de massa de mil grãos nos tratamentos com P na linha de semeadura e no tratamento sem aplicação de P.

Figura 17 – Produtividade de grãos de soja (Mg ha^{-1}) em função do modo de aplicação de calcário e fósforo.



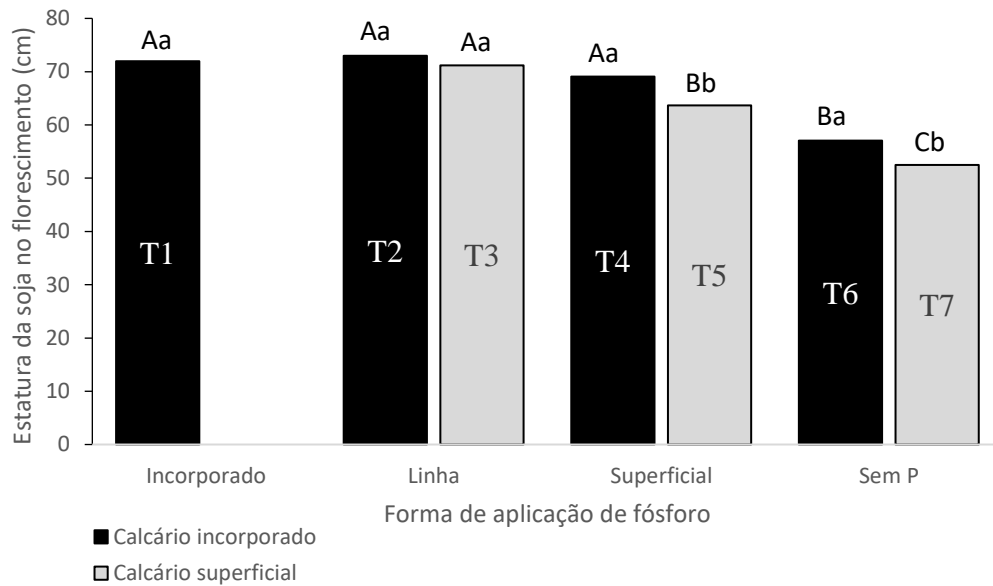
*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

Figura 18 – Diferença relativa na produtividade de grãos de soja em relação a aplicação de fósforo incorporado ao solo.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

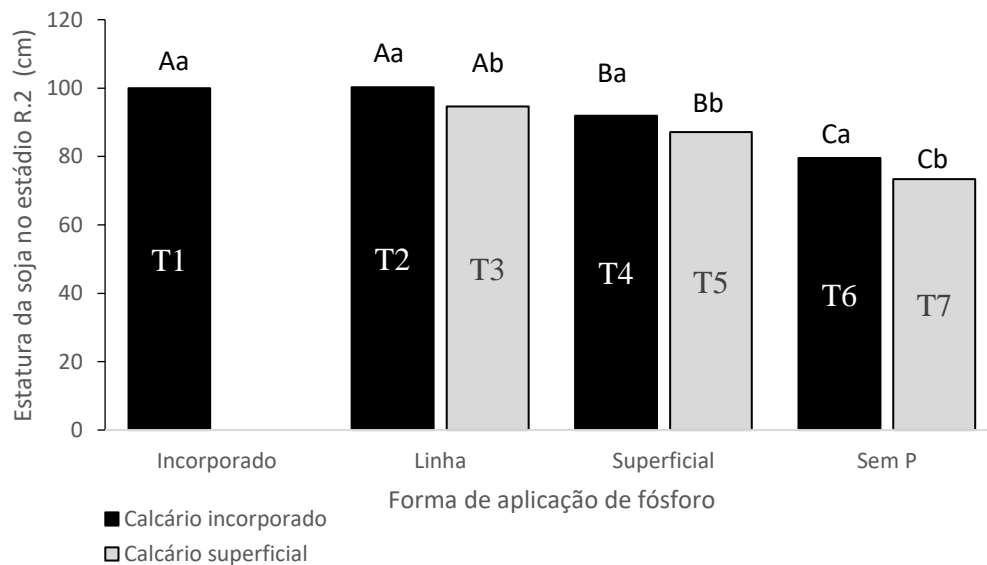
Figura 19 – Estatura da soja (cm) no florescimento de acordo com o modo de aplicação de fósforo e calcário no solo.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P.

*Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

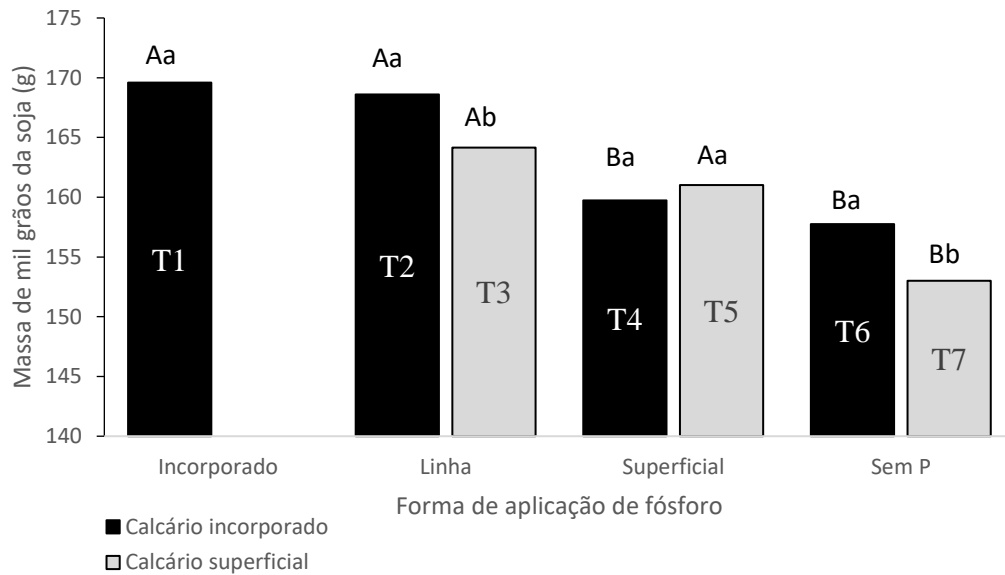
Figura 20 - Estatura da soja (cm) no estágio fenológico R2 de acordo com o modo de aplicação de fósforo e calcário no solo.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P.

*Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

Figura 21 – Massa de mil grãos da soja de acordo com o modo de aplicação de fósforo e calcário no solo.



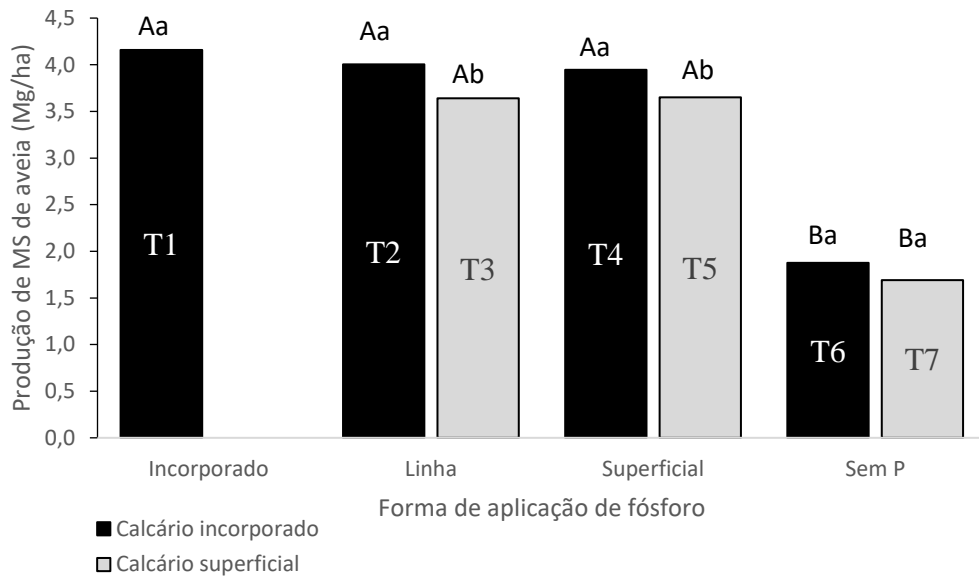
*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P.

*Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

Na figura 22 é apresentado os dados referentes a produção de MS da aveia.

A produção de MS da aveia preta não foi afetada quando o P foi aplicado incorporado ao solo, na linha de semeadura ou na superfície do solo, tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5 (Figura 22). O modo de aplicação do calcário afetou a produção de MS da aveia preta quando o P foi aplicado na linha de semeadura e na superfície do solo, T2 e T3, e T4 e T5, não havendo diferença nos tratamentos sem P.

Figura 22 – Produção de matéria seca da aveia de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.

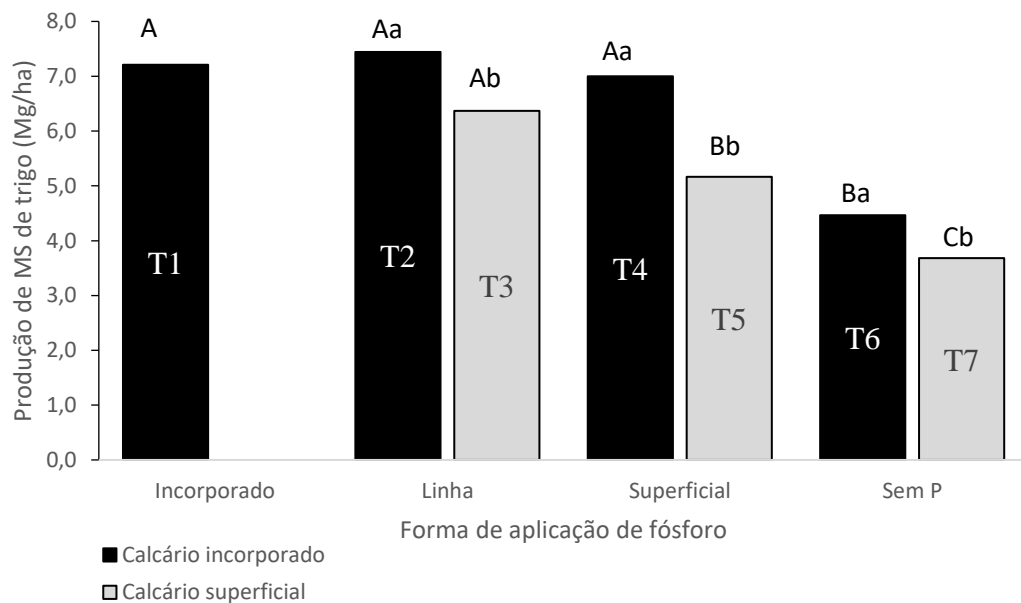


*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P.

*Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

Na Figura 23 é apresentado a produção de MS do trigo. A produção de MS total da parte aérea do trigo, foi afetada pelo modo de aplicação de P somente na condição de calagem superficial, onde a aplicação de P na superfície do solo apresentou produção de MS 25 % inferior a aplicação de P na linha de semeadura (Figura 23). O modo de aplicação do calcário afetou a produção de MS do trigo em todos os modos de aplicação de P, tratamentos T2 e T3, T4 e T5 e T6 e T7.

Figura 23 – Produção de matéria seca total da parte aérea do trigo na maturação fisiológica de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

O P é o nutriente que limita a produtividade das culturas com maior frequência (HINSINGER, 2001), pois além de suas funções orgânicas, a eficiência de recuperação de P pela planta, através da adubação fosfatada é baixa, próximo a 10% (BALIGAR, 1986). As maiores produtividades de grãos de soja obtidas neste trabalho, nos tratamentos T1 e T2, podem ser atribuídas ao suprimento de P às plantas mais eficiente. A camada superficial do solo sofre restrição de conteúdo de água devido o processo de evapotranspiração (SCHWARTZ, 2010 apud HANSEL, 2017), na cultura da cultura da soja, é intensificado no período de florescimento, onde também há maior demanda de P. Su (2015) ressalta que em condições de restrição hídrica, a aplicação de fertilizantes fosfatados na superfície do solo deve ser evitada, devido à restrição do mecanismo de difusão. O P é suprido às raízes através do mecanismo de difusão, que é severamente restringido à medida que se reduz o conteúdo de água (COSTA, 2006), portanto, teor de P em camadas de solo mais profundas, podem garantir suprimento de P adequado para as plantas, pois as camadas de solo subsuperficiais apresentam maior conteúdo de água (HANSEL, 2017).

Os processos de restrição à absorção de P pelas plantas pode ser agravado em solos compactados e com baixo teor de argila, como os Argissolos com horizonte A arenoso, neste experimento, com 20 % de argila. A aplicação de P na superfície do solo e/ou o acúmulo deste nutriente exclusivamente na superfície do solo, sofre influências mecânicas, relatado por Valadão (2017) que avaliou a resposta da soja a adubação fosfatada e diferentes intensidades de tráfego de máquinas e observou diminuição na aquisição de P pelas plantas com o aumento da compactação. A compactação superficial (abaixo da ação de mobilização do solo pela semeadora) do solo, o qual é fenômeno comum em áreas cultivadas sob SPD, leva a aproximação das partículas minerais e orgânicas, concomitantemente, a película de água que recobre os minerais reduz a espessura, aumentando a energia de ligação da água com os grupos funcionais, bem como aproximando os íons fosfato à superfície reativa do mineral, diminuindo a concentração de P na solução do solo e restringindo a difusão do íon fosfato (RIBEIRO, 2010).

Barbosa (2015) realizou um experimento variando proporções de aplicação de P na linha de semeadura e na superfície do solo, de 100 % em superfície a 100 % na linha de semeadura, e observou incremento de produtividade de grãos de soja e estatura de plantas à medida que se aumentou a proporção de P aplicado na linha de semeadura. Da mesma forma, Hansel (2017) e Motomiya (2004), observaram melhores respostas de produtividade de grãos quando o P foi aplicado na linha de semeadura. Os autores destacam que é provável que em condições de altas concentrações de P no solo e regime hídrico dentro da normalidade, o modo de aplicação de P tende a apresentar pouca diferença.

Nkebiwea (2016) realizou uma revisão bibliográfica com 772 artigos científicos avaliando a resposta da localização de aplicação de fertilizantes, onde conclui que a aplicação de nutrientes em subsuperfície, na linha de semeadura e modos similares, proporcionou maior absorção de nutrientes pelas raízes, maior concentração de nutrientes no tecido e maiores produtividades, corroborando com os resultados obtidos neste trabalho. Os tratamentos, observados neste trabalho, que possuem maior volume de solo rico em P, Ca e Mg, obtiveram os melhores resultados de produtividade de grãos de soja, massa de mil grãos e estatura de plantas, correlacionando fortemente maior eficiência de absorção de nutrientes e melhor nutrição da planta.

Cavalli (2016) observou correlação de 99% da estatura de plantas de soja com o aumento da dose de P, reforçando a influência deste nutriente no crescimento da planta. Valadão (2017) observou aumento da estatura da soja com doses crescentes de P e maior

resposta quando o P foi aplicado na linha de semeadura em comparação ao P aplicado na superfície do solo, também obtendo maior produtividade da soja, na maior dose de P, quando a adubação foi realizada na linha de semeadura. É possível inferir que o modo de aplicação de P influenciou a eficiência de recuperação do P, sendo proporcional ao volume de solo com teor de P suficiente.

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que à medida que se restringiu o volume de solo com teor de P acima do teor crítico, $P \text{ incorporado} > P \text{ linha} > P \text{ superfície}$, houve redução de produtividade da soja, apresentando o mesmo comportamento para estatura de plantas e massa de mil grãos e teor de P no tecido, reforçando o P como limitante a produtividade da cultura da soja, principalmente devido à disposição no perfil do solo e possibilidade de absorção. Do mesmo modo, onde a distribuição de Ca e Mg no perfil do solo, resultantes do modo de aplicação de calcário, foi mais homogênea e com teor suficiente, houve incremento de produtividade, em média de 20 %. Nos tratamentos onde não se aplicou P, a melhor distribuição de Ca e Mg no perfil do solo, com incorporação de calcário, proporcionou incremento de 20 % na produtividade de grãos de soja, evidenciando a maior eficiência de absorção destes nutrientes nesta condição.

Nkebiwea (2016), atribui os melhores resultados produtivos obtidos com aplicação de nutrientes em subsuperfície: (1) a manutenção de maior concentração de nutrientes em formas mais disponíveis próximo ao sistema radicular; (2) estímulo ao crescimento radicular próximo a deposição de nutrientes, principalmente induzido por P e N (ARKOUN, 2012 apud NKEBIWEA, 2016; FORDE & LORENZO, 2001 apud NKEBIWEA, 2016; ZHANG, 2000 apud NKEBIWEA, 2016); (3) indução de alteração química da região rizosférica benéficas a absorção de nutrientes (JING, 2012 apud NKEBIWEA, 2016); (4) melhora das propriedades biológicas da rizosfera (HUBER, 2008 apud NKEBIWEA, 2016), condição importante na cultura da soja que possui simbiose com microrganismos fixadores de N; (5) redução de lixiviação e transporte de nutrientes, o que é agravado com deposição superficial de nutrientes (DELL, 2011).

Borkert & Barber (1983) realizaram um estudo, onde expuseram o sistema radicular da soja a diferentes proporções de solo rico em P. Os autores concluíram que à medida que se aumentou o volume de solo fértil em P, conseqüentemente maior área de contato de P com o sistema radicular, houve incremento linear de acúmulo de MS da parte aérea da soja e das raízes, bem como maior teor de P no tecido das plantas. O experimento de Borkert & Barber (1983) sustentam os melhores resultados produtivos e de concentração de P no tecido da soja,

neste experimento à medida que o volume de solo rico em P foi aumentado (tratamentos T1 e T2).

Na Figura 18, observa-se que com aplicação de P na linha de semeadura, com calagem superficial, a produtividade de grãos foi 25% inferior ao mesmo modo de aplicação de P submetido a incorporação de calcário. Estes resultados indicam que a localização de deposição de fertilizante fosfatado, isoladamente, não é a única variável quanto a absorção de P pelas raízes. A aplicação de P na linha de semeadura em profundidade onde o pH do solo se encontra baixo, como ocorreu neste experimento, no tratamento T3, aumenta a adsorção do P solúvel do fertilizante, devido ao favorecimento de ligações químicas de maior grau de covalência com os grupos funcionais dos minerais, bem como menor taxa de dessorção de P para a solução do solo corroborando com os resultados obtidos por Tucher (2018) e Saunders (1958).

A influência do pH do solo sobre os fenômenos de sorção do P, pode explicar parcialmente a variabilidade de resultados encontrados em diversos trabalhos avaliando o modo de aplicação de P, onde a aplicação do fertilizante fosfatado ocorre em posição vertical e área de distribuição distinta no perfil do solo, com ambiente químico completamente distinto, afetando a fração de P passível de absorção pelas raízes. A atividade dos íons fosfato é crucial para haver absorção pelas raízes (NOVAIS, 2007), sendo afetado pela presença e concentração de outros íons e compostos de carbono na solução do solo, portanto, a comparação na resposta produtiva das plantas com aplicação de P em localização distinta, deve levar estes fatores em consideração.

Wang (2010) em uma revisão de literatura sobre melhora na eficiência de absorção de P pela soja em função da arquitetura radicular e Zao (2004), em um experimento com ampla variabilidade genótipos com diferentes arquiteturas radiculares, afirmam que genótipos de soja com arquitetura radicular rasa, apresentam grande vantagem na eficiência do uso do P e sugerem direcionamento de seleção de genótipos para cultivo com esta arquitetura radicular. Estes trabalhos partem da premissa do acúmulo de P, naturalmente e pelo manejo antrópico, na superfície do solo, portanto, genótipos de soja com arquitetura radicular rasa seriam mais eficientes na absorção de P devido a maior área superficial das raízes em contato com o P. Este conceito precisa ser avaliado com cuidado, pois toma como base uma condição restrita de acúmulo de P na superfície do solo e busca a adaptação da planta a uma condição existente, não considerando a possibilidade de manejo do solo com alteração da distribuição de P no perfil do solo e suas implicações. Em geral, quando a soja é cultivada em solos com

acúmulo de P na superfície do solo e boa disponibilidade hídrica, a produtividade costuma ser satisfatória, pela não restrição de absorção através do mecanismo de difusão.

Em regiões tropicais e subtropicais, sem irrigação, e que ocorrem pequenas estiagens, o rápido decréscimo da umidade no solo nos primeiros centímetros do perfil do solo, devido à alta evapotranspiração e alta incidência de radiação solar (SCHWARTZ, 2010 apud HANSEL, 2017), leva a severa restrição na absorção de P, como evidenciado neste trabalho, com aplicação de P na superfície do solo, sem irrigação, onde houve menor produtividade de grãos de soja e estatura de plantas em comparação com aplicação de P em subsuperfície, como salientado por Su (2015) que relata a limitação de absorção de P em superfície em condições de oscilação de disponibilidade hídrica superfície do solo.

Na produção de MS do trigo se observou influência no modo de aplicação de calcário, havendo incremento de produção em todos os modos de aplicação de P. ZANATTA & MUNDSTOCK (1988), realizaram um estudo com duas cultivares de trigo e as submeteram a doses crescentes de calcário em dois níveis de P no solo, baixo e alto. Os autores observaram incremento linear de MS da parte aérea do trigo à medida que se aumentou a dose de calcário aplicada, 0, 1/4, 1/2 e 1 SMP, bem como incremento linear da MS do trigo à medida que se aumentou a dose de calcário com nível de P alto, o que não ocorreu no nível baixo de P. Os autores também observaram aumento linear da MS das raízes do trigo, no nível alto de P, à medida que se aumentou a dose de calcário aplicada no solo e diminuição da relação parte aérea, causado pela maior massa de raízes. Os resultados encontrados pelos autores corroboram com os resultados obtidos neste trabalho, onde foi observado incremento de produção de MS da parte aérea do trigo pela calagem incorporada nos tratamentos T2, T4, T6 em comparação aos tratamentos T3, T5 e T7. Apesar deste trabalho não avaliar doses crescentes de calcário, fica evidenciado a influência do modo de aplicação de calcário na capacidade de neutralização da acidez do solo, onde a incorporação de calcário mostrou maior correção do perfil do solo até 25 cm de profundidade no perfil do solo, em comparação a aplicação superficial de calcário.

A alteração dos parâmetros relacionados a acidez do solo pelo modo de aplicação de calcário, observadas neste trabalho, mostram que na condição de calcário aplicado na superfície do solo, nas camadas de solo de 5 – 10, 10 – 15 e 15 – 20 cm, o pH do solo foi de 5,4, 4,9 e 4,7, e a saturação por Al foi de 6, 33 e 50 %, respectivamente. A nocividade do Al^{+3} às plantas de trigo é bastante estudada, causando severa restrição no crescimento das plantas e do sistema radicular do trigo, sendo relatada por diversos autores, Zanatta & Mundstock

(1988), Delhaize (2009), Pereira (2018) e Kochian (2015). Estes dados explicam a redução da produção da MS do trigo quando cultivado na condição de calagem superficial, apesar de ter sido aplicado dose de calcário suficiente para correção da acidez, a baixa mobilidade vertical deste modo de aplicação de calcário, levou a baixo pH do solo e alta saturação por Al em subsuperfície, afetando o crescimento do trigo.

A produção de MS do trigo não sofreu alteração dos modos de aplicação de P, com exceção da testemunha, quando o calcário foi incorporado ao solo, indicando não ter havido restrições a aquisição de P pelas plantas de trigo nesta condição. Já, quando o calcário foi aplicado na superfície do solo, houve redução na produção de MS do trigo quando o P foi aplicado na superfície do solo em relação a aplicação na linha de semeadura, tratamentos T5 e T3, respectivamente.

O período de crescimento do trigo se dá no inverno, nos meses de maio a outubro, com precipitação média mensal de 140 mm, temperatura média diária de 15 °C, temperatura máxima não ultrapassando os 25 °C e baixa incidência de radiação. Estas condições climatológicas proporcionam alta umidade do ar e do solo durante todo o período de crescimento do trigo. O sistema radicular do trigo tem boa capacidade de exploração na superfície do solo, portanto, a absorção de P na superfície do solo não apresenta limitações, pois há boa disponibilidade de água no solo que não limita a difusão do P, como observado no tratamento T4, que obteve a maior produção de MS juntamente com T1 e T2. Porém, o tratamento T5, apresentou menor produção de MS de trigo. Neste tratamento, o pH na camada de solo de 0 – 5 cm, foi de 6,4 após 8 meses de aplicação, um alto teor de Ca, e o teor de P nesta camada de solo foi de 49 mg kg⁻¹, reduzindo drasticamente para 5 mg kg⁻¹ na camada de solo subjacente. Portanto, a nutrição de P pelo trigo, dependeu exclusivamente da camada de solo de 0 - 5 cm. Sewell & Ozanne (1970) apud Grant (2001), observaram forte estímulo ao crescimento radicular do trigo na superfície do solo, onde apresentava alto teor de P. É muito provável que o pH do solo e o teor de Ca, na camada de solo de 0 – 5 cm, continuou se elevando após a data de observação no florescimento da soja. Estes fatores favorecem a formação de precipitados de Ca e P, como o fosfato de cálcio (MOODY, 1995) que possuem baixa solubilidade e restringem a absorção de P pelas raízes.

A produção de MS da aveia não foi afetada nos tratamentos com adição de P, independentemente do modo de aplicação, devido a aplicação de alta dose de P, 160 kg ha⁻¹ equivalente P₂O₅, aplicada no cultivo da aveia, visando a correção do solo e elevação do teor de P até o teor crítico de 18 mg kg⁻¹. A presença de formas de P mais disponíveis favoreceu a

absorção de P pela aveia preta, bem como o espaçamento reduzido (17 cm) proporcionando melhor exploração do solo e aquisição de P pelas plantas. A semeadura da aveia foi realizada imediatamente após a calagem, portando este pequeno intervalo de tempo não foi suficiente para a neutralização da acidez do solo de forma efetiva, quando o calcário foi aplicado em superfície, devido à pequena área de contato com o solo, dependendo da solubilização e migração de íons HCO_3^- e OH^- do calcário no perfil do solo. Assim, o crescimento das raízes de aveia, abaixo de 5 cm, se deu em ambiente ácido, com presença de Al^{+3} e alta saturação por Al, o que afeta o crescimento e explica o incremento de produção de MS quando o calcário foi incorporado ao solo.

5.6 CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES NO TECIDO DA SOJA

Os tratamentos afetaram a concentração de P, Ca, Mg e N no tecido das plantas e N no grão e são apresentados nas Figuras 24, 25, 26, 27 e 28. Ressalta-se que as concentrações de nutrientes no tecido correspondem a toda parte aérea da planta, não somente folhas, portando não há interpretações sobre concentrações foliares estipuladas por CQFS (2016).

A maior concentração de P no tecido foi obtido nos tratamentos T1 e T2 (Figura 24). Quando se incorporou calcário, a aplicação de P incorporada ao solo e na linha de semeadura apresentaram a maior concentração de P no tecido, seguido de aplicação na superfície e sem P. Com aplicação de calcário na superfície, não houve diferença estatística entre a aplicação de P na linha de semeadura e na superfície do solo e o menor valor ocorreu no tratamento sem aplicação de P. O modo de aplicação do calcário afetou a concentração de P no tecido da soja nos tratamentos com aplicação de P na linha de semeadura e sem P, não havendo diferença estatística com aplicação de P na superfície do solo.

A concentração de Ca no tecido da soja foi maior quando se incorporou P e calcário, não diferindo estatisticamente nos demais tratamentos e não sofrendo influência quanto ao modo de aplicação do calcário.

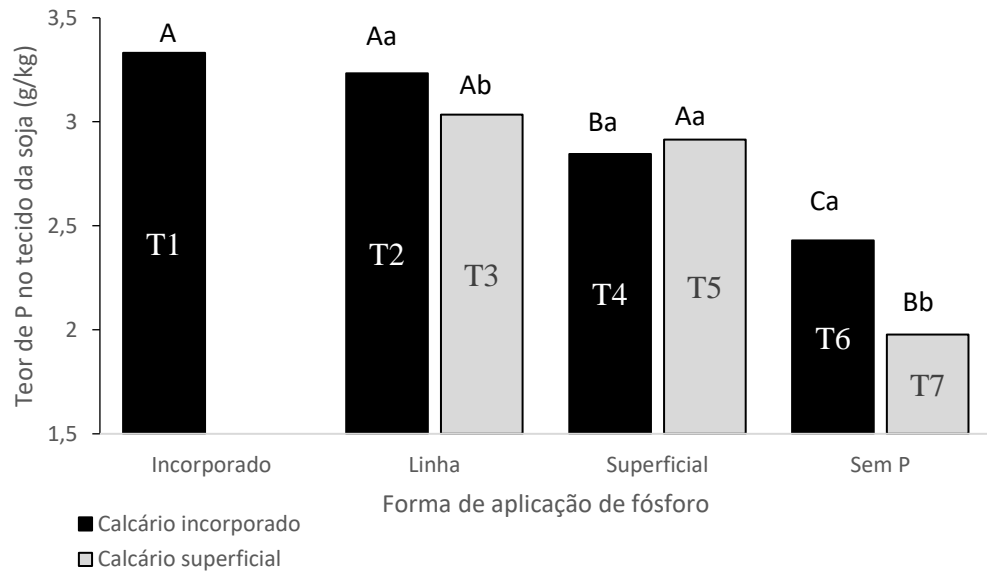
A concentração de Mg no tecido da soja, não sofreu interferência do modo de aplicação de P, porém apresentou alteração devido o modo de aplicação do calcário (Figura 26). Nos modos de aplicação de P na linha de semeadura, P na superfície e sem P, quando o calcário foi incorporado ao solo, T2, T4 e T6, respectivamente, o teor de Mg no tecido da soja

foi maior, cerca de 10% em comparação ao mesmo modo de aplicação de P com calagem superficial, T3, T5 e T7.

O teor de N no tecido da soja, na condição de calcário incorporado, foi maior no tratamento T1, igual nos tratamentos T2 e T4 e a menor concentração de N no tratamento T6 (Figura 27). Quando se aplicou calcário na superfície do solo, o tratamento T3 obteve a maior concentração de N no tecido da soja, seguido do tratamento T5 e T7. O modo de aplicação do calcário afetou o teor de N no tecido da soja quando o P foi aplicado na superfície do solo e quando não se aplicou P.

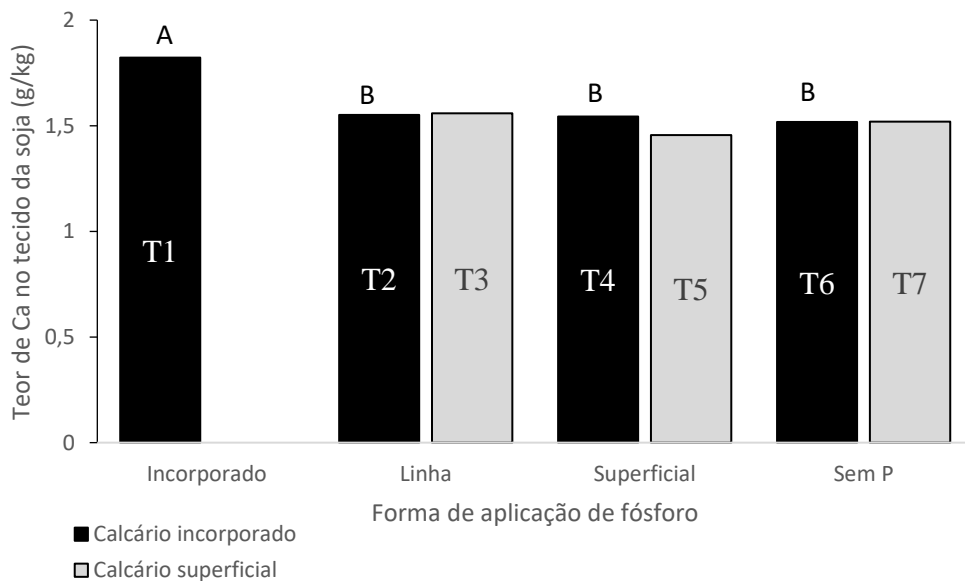
A concentração de N no grão da soja foi afetada apenas pelo modo de aplicação de P (Figura 28). Na condição de calcário incorporado, a maior concentração de N no grão de soja foi obtida no tratamento T1, igualando-se nos tratamentos T2 e T4, com a menor concentração de N no tratamento sem aplicação de P. Quando o calcário foi aplicado em superfície, o tratamento com aplicação de P na linha de semeadura apresentou a maior concentração de P nos grãos da soja, e foi igual quando o P foi aplicado na superfície e onde não se aplicou P.

Figura 24 – Concentração de fósforo no tecido da soja no florescimento de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.



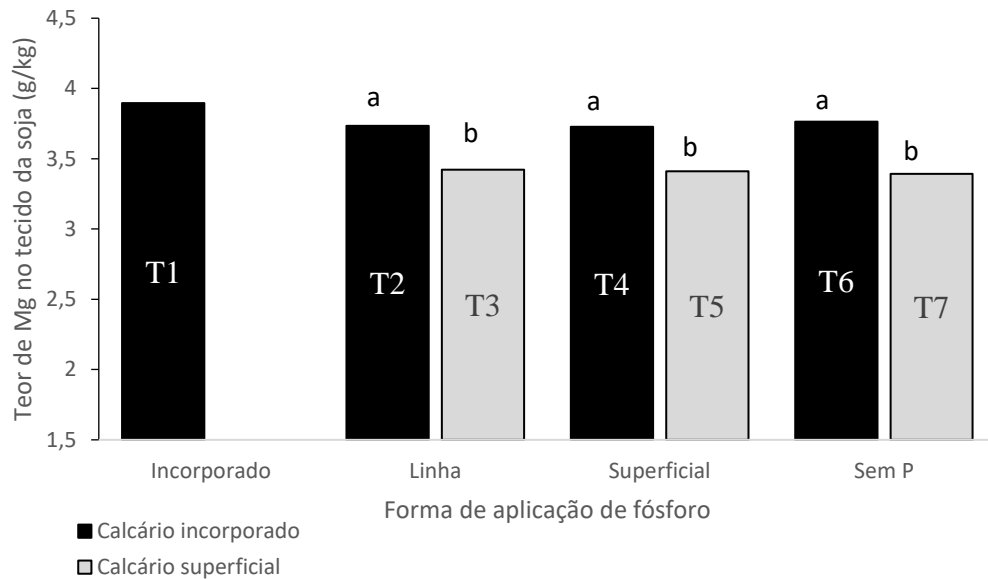
*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,05$.

Figura 25 - Concentração de cálcio no tecido da soja no florescimento de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.



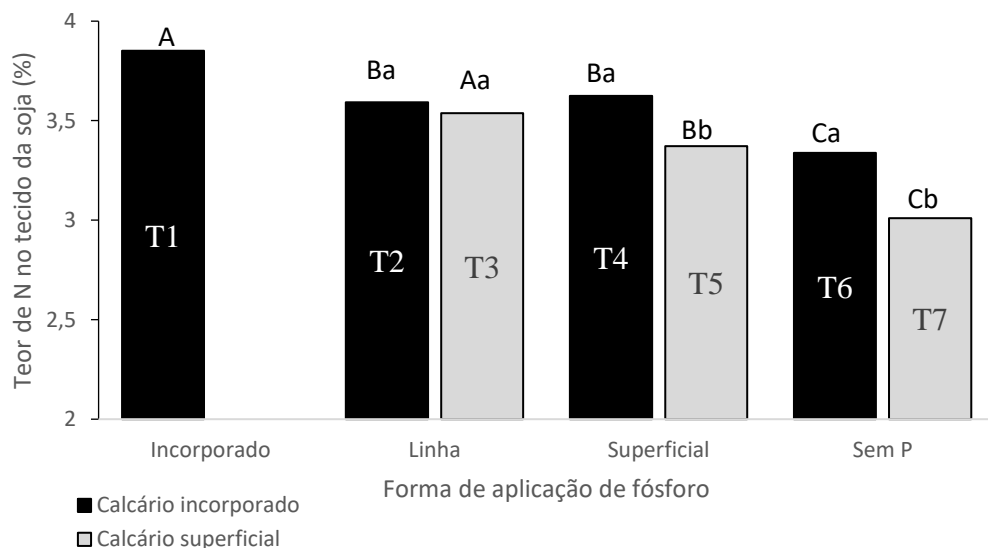
*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,05$.

Figura 26 - Concentração de magnésio no tecido da soja no florescimento de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.



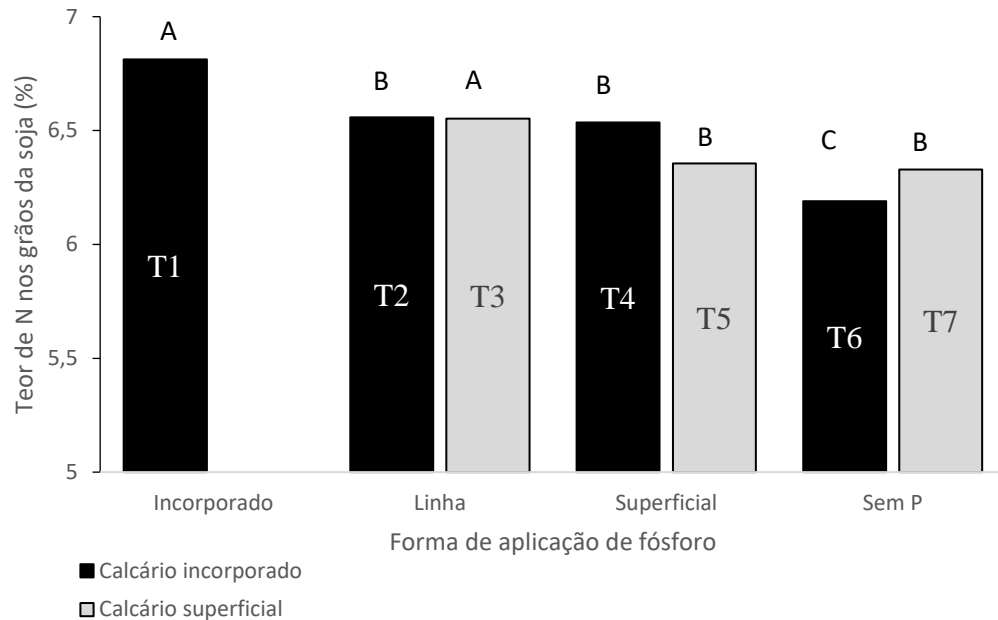
*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,05$.

Figura 27 - Concentração de nitrogênio (%) no tecido total da parte aérea da soja no florescimento de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,05$.

Figura 28 - Concentração de nitrogênio (%) no grão da soja de acordo com o modo de aplicação de calcário e fósforo.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P.

*Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,05$.

O teor de P no tecido da soja foi maior quando o calcário foi incorporado ao solo e o P foi aplicado na linha de semeadura ou incorporado ao solo (Figura 24). Salienta-se que o tratamento T1 foi submetido a incorporação de dose de correção de P, e na semeadura da soja, o P foi aplicado na linha de semeadura, mantendo o experimento sob SPD. Os resultados encontrados corroboram com a revisão de literatura sobre a localização de aplicação de fertilizantes no solo de Nkebiwe (2016), onde relata melhores resultados da aquisição de P quando o mesmo é aplicado em subsuperfície. Os resultados também corroboram com Tucher (2018) e Saunders (1958) que observaram melhor recuperação do fertilizante fosfatado quando o mesmo foi aplicado em pH entre 6,0 e 7,0. Motomiya (2004), Barbosa (2015) e Valadão (2017) também observaram maior teor de P no tecido da soja quando se aplicou P na linha de semeadura. É possível atribuir estes resultados a maior área de contato das raízes com solo fértil em P e maior constância de absorção de P quando se encontra em níveis suficientes abaixo na camada superficial do solo, corroborando com Borkert & Barber (1983) que observaram incremento da concentração de P no tecido da soja, à medida que se expos maior proporção das raízes a solo rico em P. Divergências de resultados podem ocorrer na literatura,

pois como já mencionado, a absorção de P pelas plantas é dependente de vários fatores e costuma ser suficiente quando o P é aplicado na superfície do solo em solos com altos teores de P e bom regime hídrico.

Sumner (1978) relata em seu estudo a forte influência da elevação do pH do solo, e dos teores de Ca e Mg, pela calagem, no crescimento de leguminosas, principalmente pelo favorecimento ao processo de FBN. Este fenômeno pode explicar o maior teor de P no tecido da soja quando o calcário foi incorporado ao solo.

A incorporação de calcário proporcionou maior teor de Mg no tecido da soja. Assim como o P, o Ca e Mg, com aplicação de calcário superficial, apresentaram altas concentrações na camada de solo de 0 – 5 cm, reduzindo drasticamente a concentração nas camadas de solo subjacentes, sofrendo restrições de absorção, uma vez que a aproximação destes cátions à rizosfera se dá por meio de fluxo de massa, dependente de boa umidade do solo (MARSCHNER, 2012, p. 351). O acúmulo excessivo de Ca e Mg na superfície do solo, somado a pH do solo elevado nos tratamentos com aplicação de calcário na superfície pode ter levado a formação de precipitado de Ca próximo as raízes, o que pode limitar a absorção de Mg pelas raízes por limitações físicas de deslocamento do cátion e químicas pela formação de cargas elétricas positivas que afetam a difusão e aproximação do cátion bivalente (MALZER AND S. A. BARBERS 1975; MOODY, 1995). Sumner (1978) em seu estudo, relata forte influência da elevação do pH do solo na adsorção de Mg no solo, tanto nos grupos funcionais, quanto na MOS, bem como formações de precipitados de baixa solubilidade, havendo restrições a absorção pelas plantas e impactos negativos na produção.

A concentração de N no tecido da soja sofre influências, indiretamente, do estado de nutrição da planta e diretamente da FBN, que é a principal forma de aquisição de N nesta cultura. A FBN, é afetada por fatores como a acidez do solo, a disponibilidade de nutrientes, principalmente P, Ca e N, presença de elementos tóxicos como o Al, umidade e temperatura (MOHAMMADI, 2012). Via de regra, a FBN é desfavorecida em ambiente ácido e pobre em P, que é um elemento essencial ao desenvolvimento dos microrganismos (SLATTER, 2001). Estes fatores explicam os maiores teores de N no tecido da soja nos tratamentos com incorporação de calcário e aplicação de P em camadas de solo mais profundas, como observado nos tratamentos T1 e T2, que apresentaram maior volume de solo com pH favorável e teor de P superiores, fatores que melhoram a FBN (ALVA, 1990).

Alva (1990) avaliando o impacto na nodulação de feijão causado pelo pH, Ca e atividade de Al, observou que houve restrição a nodulação e FBN do feijão em condições de baixo pH, baixo P e maior saturação por Al. Estes fatores explicam a menor concentração de N no tecido nos tratamentos com aplicação de calcário superficial, T5 e T7.

5.7 RAIZES

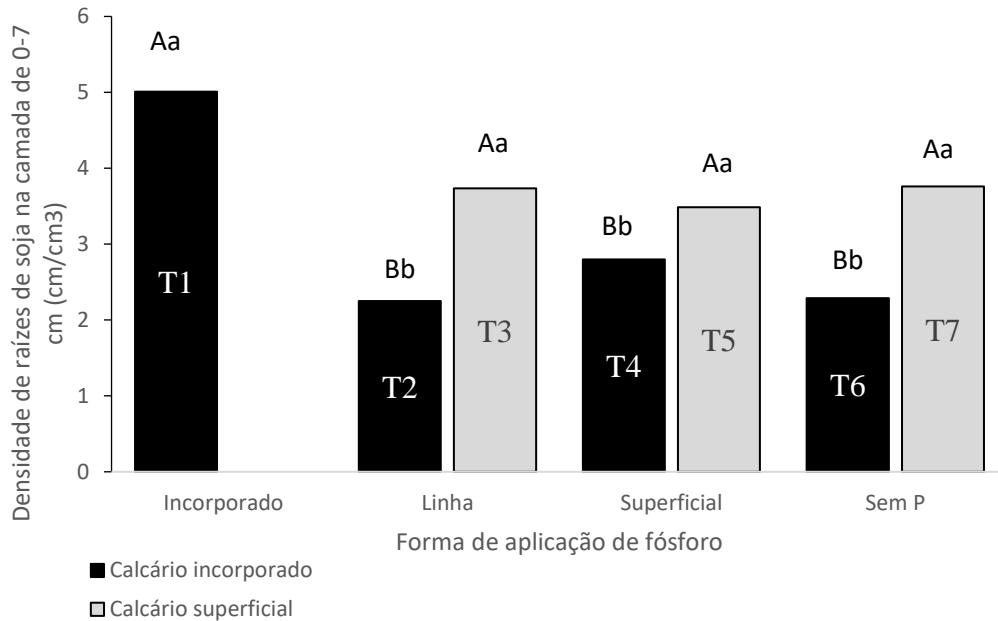
Nas Figuras 29, 30 e 31, são apresentados os resultados de densidade de raízes de soja nas camadas de solo de 0 – 7, 7 – 14 e 14 – 21 cm.

Nos tratamentos com calagem incorporada ao solo, a maior densidade de raízes na camada de solo de 0 -7 cm foi obtida no tratamento com incorporação de P, T1, não havendo diferença estatística nos demais modos de aplicação de P (Figura 29). Não houve diferença estatística de densidade de raízes, na camada de solo de 0 – 7 cm, nos modos de aplicação de P, quando o calcário foi aplicado superficialmente (Figura 29). O modo de aplicação do calcário afetou a densidade de raízes em todos os modos de aplicação de P na camada de solo de 0 – 7 cm, havendo maior densidade de raízes quando o calcário foi aplicado superficialmente, tratamentos T3, T5 e T7 em comparação aos tratamentos T2, T4 e T6.

Na camada de solo de 7 – 14 cm houve diferença estatística de densidade de raízes, com aumento da densidade de raízes quando o P foi aplicado na linha de semeadura sob calagem incorporada, em comparação a aplicação de P na superfície do solo sob calagem superficial, tratamentos T2 e T3, respectivamente (Figura 30).

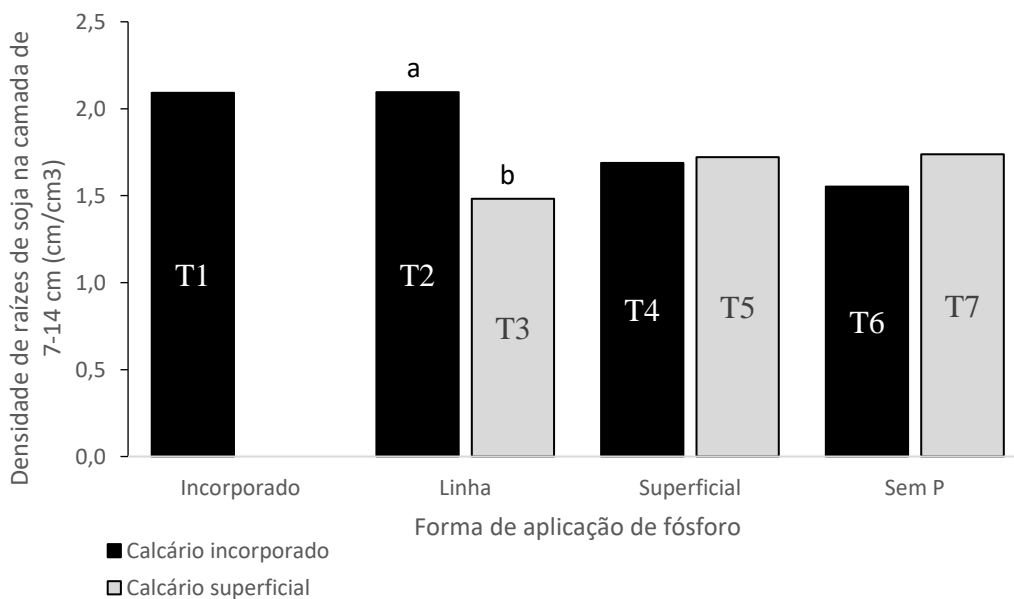
A densidade de raízes não foi afetada pelos tratamentos na camada de solo de 14 -21 cm (Figura 31).

Figura 29 – Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 0 – 7 cm.



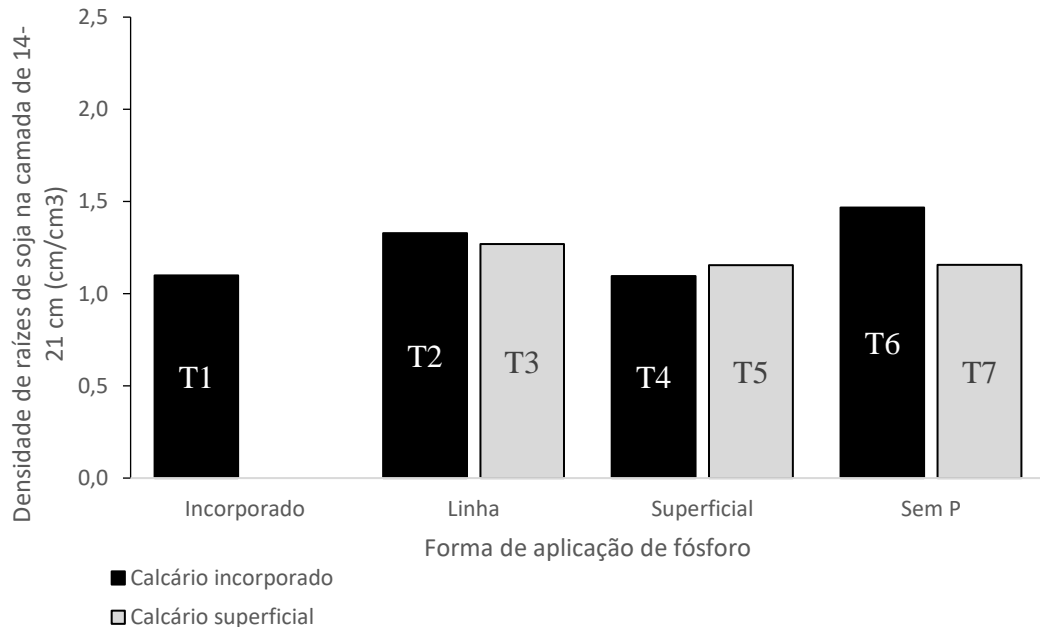
*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

Figura 30 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 7 - 14 cm.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

Figura 31 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 14 – 21 cm.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P.

*Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

Nas Figuras 32 a 37, são apresentados os resultados de densidade de raízes nas camadas de solo de 0 – 7, 7 – 14 e 14 – 21 cm divididas na porção central e lateral.

Na camada de solo de 0 – 7 cm, na porção central (Figura 32), a densidade de raízes do tratamento com incorporação de P (T1) foi cerca de 2 vezes superior aos demais modos de aplicação de P com incorporação de calcário, T2, T4 e T6. Na mesma camada de solo, quando o calcário foi aplicado na superfície do solo, o tratamento que não recebeu P (T7), apresentou densidade de raízes na porção central, de cerca de 50 % superior a aplicação de P na linha de semeadura e na superfície do solo, T3 e T5, respectivamente. A porção central das raízes foi afetada pelo modo de aplicação de calcário nos tratamentos onde não se aplicou P, havendo aumento de 100 % de densidade de raízes quando o calcário foi aplicado superficialmente.

Na camada de solo de 0 – 7 cm, na porção lateral das raízes (Figura 33), quando se incorporou calcário, a maior densidade de raízes foi encontrada com incorporação de P (T1), apresentando densidade de raízes de cerca de 50 % superior aos demais modos de aplicação de P, tratamentos T2, T4 e T6. Quando o calcário foi aplicado na superfície do solo, o modo de aplicação de P não alterou a densidade de raízes na porção lateral. A porção lateral das raízes nesta camada de solo apresentou densidade de raízes 2,5 vezes superior quando o

calcário foi aplicado superficialmente, com aplicação de P na linha de semeadura; tratamento T3 em comparação a T2, respectivamente.

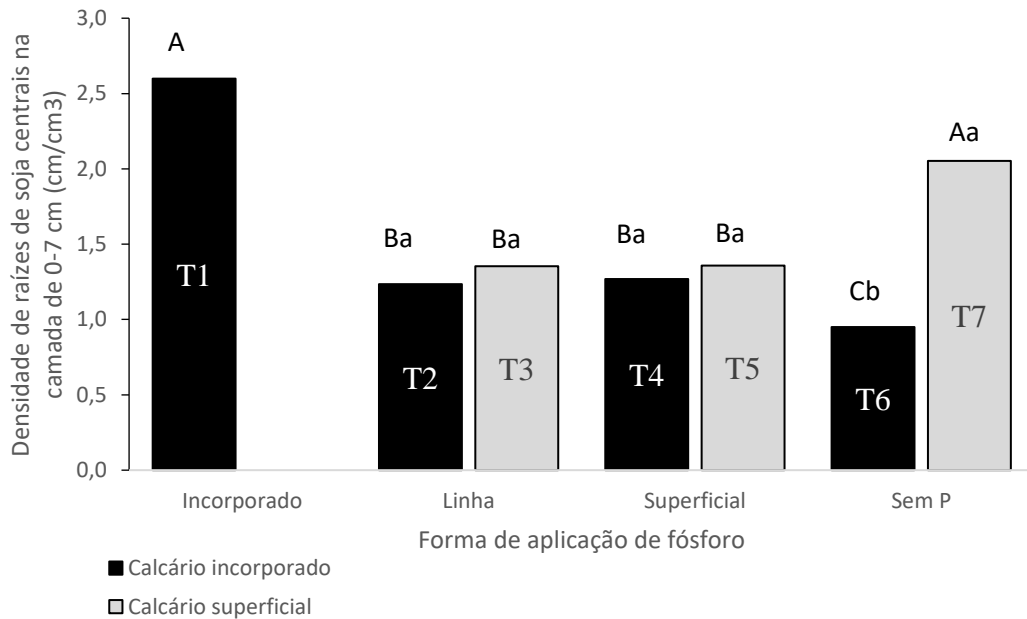
Na camada de solo de 7 – 14 cm, na porção central das raízes (Figura 34), quando o calcário foi incorporado ao solo, o tratamento com aplicação de P na linha de semeadura, T2, apresentou densidade de raízes de cerca de 90 % superior aos demais modos de aplicação de P, T1, T4 e T6. Quando o P foi aplicado na linha de semeadura, a incorporação de calcário causou incremento de 80 % na densidade de raízes na porção central, T2 em comparação a T3.

Na camada de solo de 7 – 14 cm, avaliando a porção lateral das raízes (Figura 35), quando o calcário foi incorporado ao solo, o tratamento com incorporação de P, T1, apresentou, em média, densidade de raízes 70 % superior aos demais modos de aplicação de P, T2, T4 e T6. Onde não se aplicou P, a aplicação de calcário provocou incremento de 20 % na densidade de raízes da camada de solo de 7 – 14 cm, tratamento T7 em comparação a T6.

Na camada de solo de 14 – 21 cm, na porção central das raízes (Figura 36), quando o calcário foi incorporado ao solo, o tratamento sem aplicação de P, T6, apresentou densidade de raízes, em média, 100 % superior aos demais modos de aplicação de P, T1, T2 e T4. A aplicação de calcário superficial, nesta camada de solo, provocou aumento na densidade de raízes na porção central quando o P foi aplicado na linha de semeadura, T3 em comparação a T2, e onde não se aplicou P a aplicação superficial de calcário provocou diminuição da densidade de raízes.

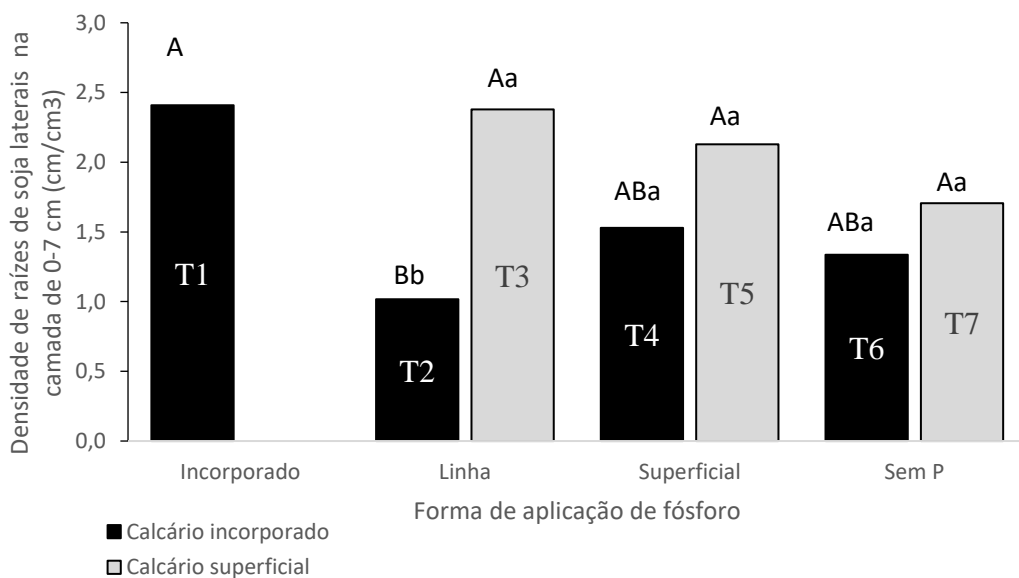
Na camada de solo de 14 – 21 cm, na porção lateral de raízes (Figura 37), onde o calcário foi incorporado ao solo, o tratamento com aplicação de P na linha de semeadura, T2, apresentou maior densidade de raízes em comparação aos demais modos de aplicação de P, tratamentos T1, T4 e T6. O modo de aplicação de calcário afetou a densidade de raízes quando o P foi aplicado na linha de semeadura, havendo incremento de cerca de 60 % quando incorporou-se calcário.

Figura 32 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 0 - 7 cm, na porção central.



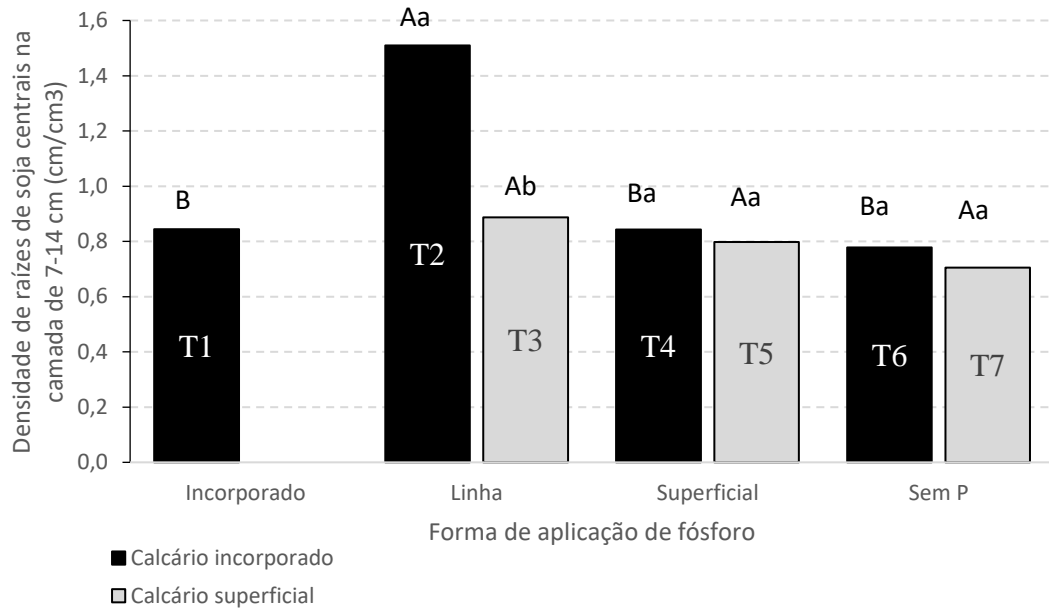
*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

Figura 33 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 0 - 7 cm, na porção lateral.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P. *Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

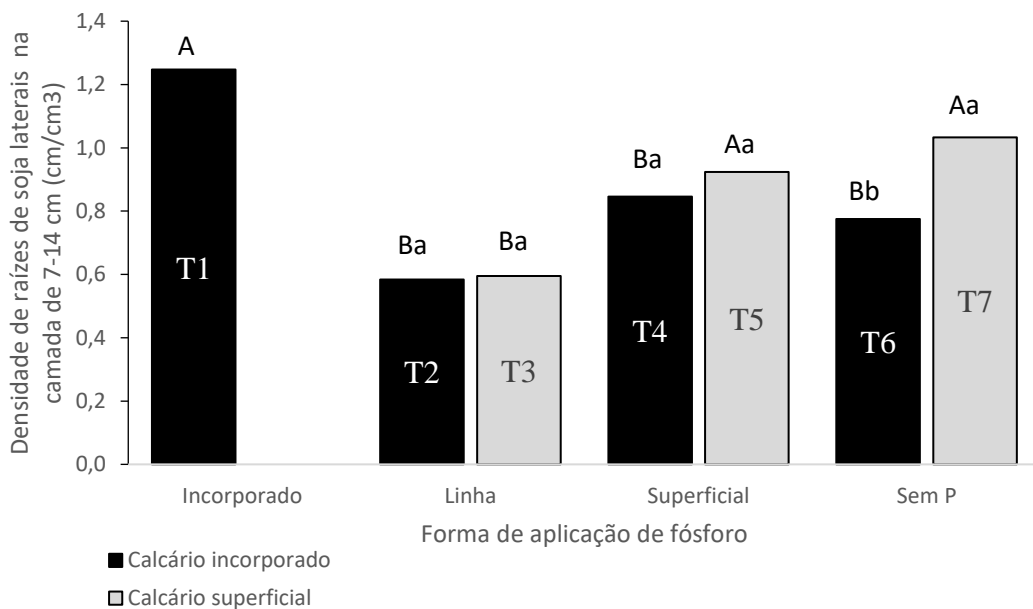
Figura 34 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 7 - 14 cm, na porção central.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P.

*Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

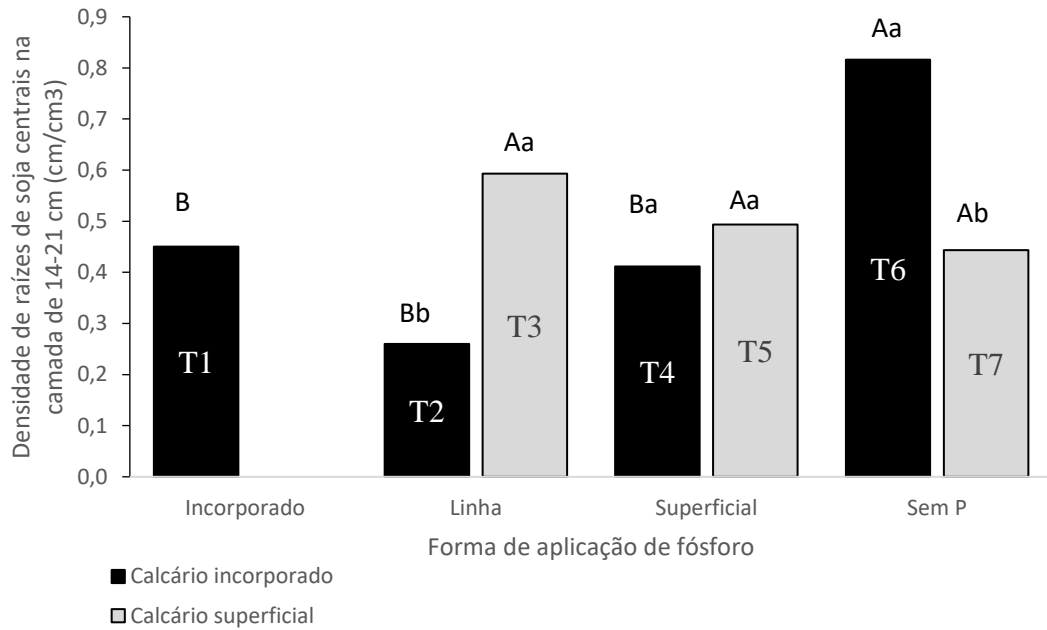
Figura 35 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 7 - 14 cm, na porção lateral.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P.

*Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

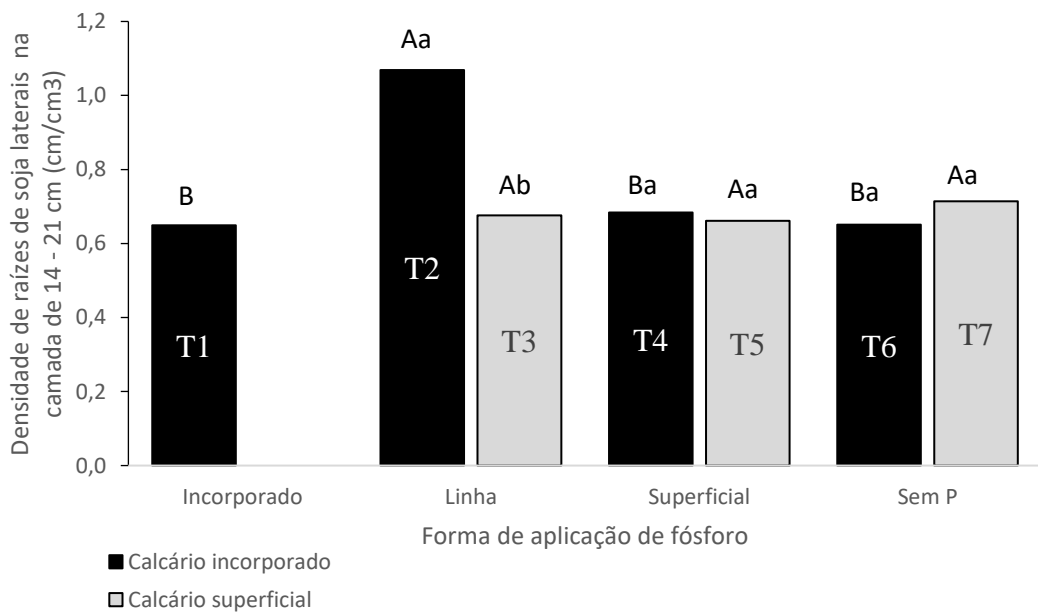
Figura 36 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 14 -21 cm, na porção central.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P.

*Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

Figura 37 - Densidade de raízes (cm cm^{-3}) na camada de solo de 14 -21 cm, na porção lateral.



*Letras maiúsculas nas colunas escuras comparam os modos de aplicação de P sob condição de calagem incorporada. *Letras maiúsculas nas colunas claras comparam o modo de aplicação de P sob a condição de calcário superficial. *Letras minúsculas comparam o efeito da calagem em cada modo de aplicação de P.

*Médias não seguidas da mesma letra na coluna diferem no teste de Tukey $p < 0,1$.

Nkebiwe (2016) relata em sua revisão sobre a localização de aplicação de fertilizantes, que a aplicação de P, e P associado a N, em subsuperfície, aumenta a eficiência de recuperação de P pelas plantas, obtendo maiores teores de P no tecido e rendimento produtivo. O autor também relata haver forte indução de crescimento radicular pela sinalização de zonas do solo ricas em P, sendo ainda maior quando o fertilizante fosfatado é associado a N. É preciso maiores estudos sobre a indução de crescimento radicular da soja com aplicação de fertilizante fosfatado e nitrogenado em subsuperfície, avaliando o impacto na FBN pela presença de N mineral.

Na camada superficial do solo, 0 – 7 cm, observa-se que na condição de calagem incorporada, o tratamento com incorporação de P, T1, apresentou densidade de raízes 2 vezes maior que os demais modos de aplicação de P. Este tratamento também apresentou os maiores valores de parâmetros produtivos da soja, como produtividade de grãos, estatura de planta, massa de mil grãos e nutrientes no tecido. A distribuição de P no perfil do solo, ao acesso das raízes, possibilitou maior absorção deste nutriente e maior expressão do potencial produtivo da soja. O melhor estado de nutrição da planta, em especial o P, estimula aumento de emissão de raízes, bem como, pelos maiores valores produtivos obtidos, a planta tende a equilibrar a relação raiz parte aérea para sustentação da demanda do tecido vegetal e das estruturas reprodutivas. O estímulo ao crescimento radicular, observado no tratamento com incorporação de P, corrobora com Borkert & Barber (1983) que observaram maior crescimento das raízes da soja quando se aumentou a proporção de solo fértil em P e a planta apresentava maior produção de MS. Esperava-se aumento de emissão de raízes nas camadas de solo mais profundas, o que não ocorreu. É possível que o teor de P existente na camada de solo 14 – 21 cm, não foi suficiente para estímulo de emissão local de raízes, havendo estímulo a emissão de raízes na camada de solo até 14 cm de profundidade.

Em todos os modos de aplicação de P, quando feito na condição de calagem superficial, houve estímulo a emissão de raízes na camada superficial do solo, 0 – 7 cm, em comparação a incorporação de calcário, principalmente da porção lateral das raízes. Os tratamentos com calagem superficial, apresentaram os maiores teores de P na camada de solo de 0 – 5 cm, bem como teor de P acima do teor crítico, apenas na camada de solo de 0 – 5 cm, havendo redução do teor de P no solo ao nível da testemunha abaixo dos 5 cm no perfil do solo, portanto, a absorção de P pela planta depende exclusivamente dos primeiros 5 cm do perfil do solo. A alta concentração de P na superfície do solo, somado a baixo teor de P abaixo dos 5 cm do perfil do solo, estimularam a emissão de raízes na superfície do solo, que

se expressou pelas raízes laterais da planta, onde o solo apresentava maior teor de P, corroborando com Chassot (2001) e Sewell & Ozanne (1970) apud Grant (2001) que observaram emissão de raízes em zonas do solo ricas em P e N.

O aumento de densidades de raízes na superfície do solo, nos tratamentos com calagem superficial, em solo com alta concentração de P na superfície do solo, não foi capaz de suprir a demanda de P pela planta, o que se expressou em menor produtividade, menor estatura de planta e menor teor de P na parte aérea da soja. Isto se deve ao fato das restrições à absorção de P na camada superficial do solo, já abordadas neste trabalho, bem como da competição das raízes entre plantas na camada de solo superficial. Além das restrições a absorção de P na superfície do solo, Jungk & Barber (1974) apud Borkert & Barber (1985) observaram em seu estudo, que a absorção de P pelas raízes de milho não foi linear à medida que a concentração de P aumentou em solução nutritiva, e relatam que a taxa de absorção de P possui um teto (V_{max}), portanto, após as raízes atingirem a máxima taxa de absorção de P, o aumento de concentração de P na solução do solo não incrementa P no tecido e respostas produtivas.

Os tratamentos com aplicação incorporada de calcário, com exceção do P incorporado, apresentaram menor densidade de raízes, principalmente na camada de solo de 0 – 7 cm, em comparação com os tratamentos com aplicação superficial de calcário. Contudo, esta redução de densidade de raízes não se refletiu em menor desempenho produtivo, evidenciando a melhor captação de P pelas raízes da soja quando o P se encontra em teor suficiente e em maior volume de solo.

O tratamento com aplicação de P na linha de semeadura e calagem incorporada, T2, apresentou maior densidade de raízes na camada de solo de 7 – 14 cm, em comparação ao mesmo modo de aplicação de P com calagem superficial, evidenciado pela maior densidade de raízes observado na porção central da camada de solo de 7 – 14 cm. O tratamento T3 também recebeu aplicação de P na linha de semeadura, porém, em pH abaixo de 5,5, portanto houve maior adsorção de P com os grupos funcionais dos minerais, não refletindo em elevação do teor de P na camada de solo de 7 – 14 cm. A deposição de fertilizante fosfatado, na linha de semeadura, apresenta a característica de elevar o teor de P solúvel rapidamente logo após a aplicação, que é amplificado pelo volume de solo restrito que é aplicado. A alta concentração de P solúvel, próximo ao sistema radicular estimulou o crescimento local das raízes da soja na camada de solo de 7 – 14 cm no tratamento T2, como relatado por Nkebiwe (2016) e Chassot (2001). O tratamento T2, recebeu aplicação de alta dose de P (bem como os

demais tratamentos com seus respectivos modos de aplicação), 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na linha de semeadura para a correção do P no solo, como preconizado por CQFS (2016). Este fato também contribui para a emissão de raízes nesta camada de solo.

A densidade de raízes na camada de solo e 14 – 21 cm, não sofreu interferências no modo de aplicação de calcário e P. Os atributos químicos do solo nesta camada de solo, nos diferentes tratamentos, apresentaram extremas variações de pH do solo, teor de P, teor de Ca, teor de Mg, saturação por bases e saturação por Al, porém esta grande variação de ambiente químico não impediu o crescimento de raízes na camada de solo mais profunda avaliada, evidenciando a plasticidade e capacidade adaptativa do sistema radicular da soja.

6 CONCLUSÕES

A incorporação de calcário até 20 cm de profundidade, somado a aplicação de P na linha de semeadura e incorporado ao solo, proporciona maior produtividade de grãos de soja, bem como estatura de plantas, massa de mil grãos e teores de P, Ca, Mg e N no tecido da soja.

A incorporação de calcário proporciona produtividade de grãos de soja, em média, 20 % superior a aplicação de calcário superficial, independentemente do modo de aplicação de P.

A produtividade de grãos de soja com aplicação de P e calcário na superfície do solo, apresenta redução de 30 % em comparação ao tratamento com calcário e P incorporado na camada de solo de 0 – 20 cm.

A incorporação de calcário apresenta melhor capacidade de neutralização da acidez do solo em camadas de solo mais profundas, bem como incremento de Ca e Mg até 25 cm de profundidade no perfil do solo, de forma homogênea, em comparação com a aplicação superficial de calcário.

O sistema radicular da soja tem aumento de densidade de raízes na camada superficial do solo (0 – 7 cm) quando o calcário é aplicado superficialmente no solo, apresentando correlação com o maior teor de P nesta camada de solo. A aplicação de P na linha de semeadura, quando o calcário é incorporado ao solo, estimula a emissão de raízes na camada de solo de 7 – 14 cm, principalmente a porção central do sistema radicular da soja.

A produção de MS do trigo é maior quando o calcário é incorporado ao solo, devido ao fato da melhor correção da acidez do solo e neutralização do Al trivalente, ao qual provoca restrição ao crescimento do trigo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho visou agregar informações, junto aos demais trabalhos na área, para esclarecer as melhores condições de manejo da adubação fosfatada e de corretivos para otimizar o desempenho produtivo da soja, que é cultivada em grande área das terras agrícolas do território nacional.

Os resultados deste trabalho indicam haver limitações no manejo adotado em áreas sob SPD com aplicação de corretivos e fertilizantes fosfatados na superfície do solo, pois este manejo leva a restrições na absorção de P pelas plantas quando se encontra exclusivamente na camada de solo superficial, com alto risco de perdas no sistema, principalmente por erosão superficial que acarreta em transporte de nutrientes para águas superficiais, bem como redução do potencial produtivo da soja. A correção da acidez do solo em camadas de solo mais profundas em solos com acidez elevada, apresenta profundas limitações com aplicação superficial de calcário, que, assim como o P, tem potencial de perdas por erosão quando aplicado na superfície do solo.

Frente aos resultados obtidos neste trabalho e a revisão da literatura, propõe-se, em áreas sob SPD, monitoramento da camada de solo abaixo de 10 cm quanto aos parâmetros relacionadas a acidez do solo, bem como em áreas com acidez do solo elevada, sugere-se incorporação de calcário a 20 cm de profundidade, visando correção efetiva da acidez do solo, que favorece a ação de neutralização da acidez do solo com posterior aplicação de calcário na superfície do solo, consequentemente, preservando a estrutura do solo e os benefícios do não revolvimento do solo em SPD. Também sugere-se que o teor de P no solo seja elevado em maior volume de solo, com aplicação de P na linha de semeadura, em pH do solo favorável, visando maior área de contato do sistema radicular da soja com solo fértil em P e proteção do P a perdas por erosão superficial, que favorece a absorção deste nutriente frente a redução da umidade do solo nos primeiros centímetros do perfil do solo, condição frequente devido ao clima brasileiro e estação de cultivo da cultura da soja.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGHINONI, I. & BARBER, S. A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. **Agronomy Journal**, v. 72, p. 685-688, 1980, apud BORKERT, C.M. & BARBER, S.A. Soybean shoot and root growth and phosphorus concentration as affected by phosphorus placement. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 49, p.152-155, 1985.
- BARBOSA, N. C. et al. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. **Biosci. J.**, v. 31, n. 1, p. 87-95, 2015.
- BARROW, N. J. Reaction of anions and cations with variable - charge soils. **Advances In Agronomy**, v. 38, 1985.
- BARROW, N. J. The Description of Phosphate Adsorption Curves. **Journal of Soil Science**, v. 29, n. 4, p. 447-462, 1978.
- BARROW, N. J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. **Plant and Soil**, v. 410, n. 1-2, p. 401-410, 2016.
- BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de culturas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.21, p. 105-112, 1997, apud CIOTTA, M. N. et al. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 1055-1064, 2002.
- BEZERRA, A. L. L., et al. Influência da calagem na adsorção de fósforo em diferentes solos do estado do Ceará. **Agropecuária Científica No Semiárido**, v. 9, n. 4, p. 01 - 05, 2013.
- BORKERT, C.M. & BARBER, S.A. Soybean shoot and root growth and phosphorus concentration as affected by phosphorus placement. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 49, p.152-155, 1985.
- BORTOLUZZI, E. C. et al. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, v. 104, p. 196-204, 2015.
- BRUNETTO, G. et al. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29 n. 4, 2005.
- BRUNO, I. et al. Phosphorus Efficiency in Brazilian Soybean Cultivars. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 25, n. 4, p. 1-14, 2018.
- CAIRES, E. F. et al. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 27-34, 1998.
- CAIRES, E. F. et al. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 57-64, 2008.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 3, p. 791–798, 2005.

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 1, p. 3–12, 2006.

CAIRES, E.F.; BANZATTO, D.A. & FONSECA, A.F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 24, p.161-169, 2000.

CALEGARI, A. et al. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32–39, 2013.

CAPOANE, V. et al. Transferência de nitrogênio e fósforo para águas superficiais em uma bacia hidrográfica com agricultura e produção pecuária intensiva no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 647–650, 2015.

CASSIOLATO et al. Evaluation of oat extracts on the efficiency of lime in soil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.43, n.5, p. 533-536, 2000.

CASSIOLATO, M.E. et al. Evaluation of oat extracts on the efficiency of lime in soil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 43, n. 5, p. 533–536, 2000.

CHASSOT, A., STAMP, P., RICHNER, W. Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. **Plant Soil**, v. 231, p. 123–135, 2001.

CIOTTA, M. N. et al. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 1055–1064, 2002.

CLIMATE-DATA. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/julio-de-castilhos-43837/>. Acesso em 01/02/2019.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre: SBCS – Núcleo Regional Sul, 2016.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos - 4ª levantamento. Monitoramento Agrícola, v. 5, n. 4, p. 1-132, 2018.

COSTA, C. H. M. & 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.

DELHAIZE, E. et al. Transgenic barley (*Hordeum vulgare* L.) expressing the wheat aluminium resistance gene (*TaALMT1*) shows enhanced phosphorus nutrition and grain production when grown on an acid soil. **Plant Biotechnology Journal**, v. 7, n. 5, p. 391–400, 2009.

DOS ANJOS TOLEDO, J. et al. Tampão Santa Maria (TSM) como Alternativa ao Tampão SMP para Medição da Acidez Potencial de Solos Ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 427–435, 2012.

DUMALE JR., W. A. et al. SOC Turnover and Lime-CO₂ Evolution during Liming of an Acid Andisol and Ultisol. **Open Journal of Soil Science**, v. 01, n. 02, p. 49–53, 2011.

EIMIL-FRAGA, C. et al. Influence of parent material on the aluminium fractions in acidic soils under *Pinus pinaster* in Galicia (NW Spain). **Geoderma**, v. 255–256, p. 50–57, 2015.

ERNANI, Pa. R.; RIBEIRO, M. F.S.; BAYER, C. Chemical Modifications Caused by Liming below the Limed Layer in a Predominantly Variable Charge Acid Soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 35, n. 5–6, p. 889–901, 2004.

FINK, J. R. Diffusion and uptake of phosphorus, and root development of corn seedlings, in three contrasting subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. **Biol Fertil Soils**, 2015.

FORDE, B., LORENZO, H. The nutritional control of root development. **Plant Soil**, n. 232, p. 51–68, 2001, apud NKEBIWE, P. M. et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 196, p. 389–401, 2016.

GALLO, J. & CATANI, R. A. Solubilidade De Alguns Tipos De Calcários. **Bragantia Instituto Agrônomo**, v. 13, n. 5, p. 63–74, 1954.

GRANT, C. A. et al. The importance of early season phosphorus nutrition. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 81, n. 2, p. 211–224, 2001.

GUNJIGAKE, N. & WADA, K. Effects of phosphorus concentration and pH on phosphate retention by active aluminum and iron of ando soils. **Soil Science**, v. 132, n. 5, p. 347–352, 1981.

HANSEL, F. D. et al. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 6, p. 2936–2944, 2017.

HANSEL, F. D. et al. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 6, p. 2936–2944, 2017.

HENDRIX, J. E. The effect of pH on the uptake and accumulation of phosphate and sulfate ions by bean plants. **Am. J. Bot.**, n. 54, p. 560–564, 1967 apud MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 3.ed London: Elsevier, p. 22, 2012.

HINSINGER, P. et al. Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. **Plant and Soil**, v. 321, n. 1–2, p. 117–152, 2009.

HUANG, L. et al. Rapid Nitric Acid Digestion of Plant Material with an Open-Vessel Microwave System. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 35, n. 3–4, p. 427–440, 2004.

HUBER, D.; RÖMHELD, V.; WEINMANN, M. Relationship between nutrition, plant diseases and pests. In: Marschner, P. (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, Third Edition. **Academic Press**, Elsevier, Amsterdam, p. 283–298, apud NKEBIWE, P. M. et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 196, p. 389–401, 2016.

IGWE, C. A.; ZAREI, M.; STAHR, K. Fe and Al oxides distribution in some ultisols and inceptisols of southeastern Nigeria in relation to soil total phosphorus. **Environmental Earth Sciences**, v. 60, n. 5, p. 1103–1111, 2010.

JIANG, Y. et al. IAA-producing bacteria and bacterial-feeding nematodes promote *Arabidopsis thaliana* root growth in natural soil. **Eur. J. Soil Biol**, n. 52, p. 20–26, 2012 apud NKEBIWE, P. M. et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 196, p. 389–401, 2016.

JUNGK, A. Phosphatdynamik in der Rhizosphäre und Phosphatverfügbarkeit für Pflanzen. **Die Bodenkultur (Wien)**, n. 35, p. 99–107, 1984, apud MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 3.ed London: Elsevier, 2012 apud BORKERT, C.M. & BARBER, S.A. Soybean shoot and root growth and phosphorus concentration as affected by phosphorus placement. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 49, p.152-155, 1985.

KAMINSKI, J. et al. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 573–580, 2005.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V.F., ALLEONI, L.R.F. (Eds.), *Química e mineralogia do solo — Parte I: Conceitos básicos*. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, p. 333–380, 2009, apud BORTOLUZZI, E. C. et al. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, v. 104, p. 196–204, 2015.

KOCHIAN, L.V. et al. Plant Adaptation to Acid Soils: The Molecular Basis for Crop Aluminum Resistance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 66, n. 1, p. 571–598, 2015.

KURIHARA, C. H. et al. Gradual correction of phosphorus availability in the no-tillage system. **Revista Ceres**, v. 63, n. 2, p. 256–264, 2016.

LEITE, C. et al. Phosphate fertilization in soybean during three consecutive harvests in the new Brazilian agricultural frontier. **Revista Scientia Agraria**, v. 18, p. 28–35, 2017.

LIAO, H. et al. Phosphorus and Aluminum Interactions in Soybean in Relation to Aluminum Tolerance. Exudation of Specific Organic Acids from Different Regions of the Intact Root System. **Plant Physiology**, v. 141, p. 674–684, 2006.

MACHADO, P. L.O. A. & SILVA, C. A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, n. 1–2, p. 119–130, 2001.

- MALZER, G.L. & BARBER, S. A. Precipitation of calcium and strontium sulfates around plant roots and its evaluation, **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, n. 39, p. 492-495, 1975.
- MARIN, R. S. F. et al. Efeito da adubação fosfatada na produção de sementes de soja. **Revista Ceres**, 2015.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 3.ed London: Elsevier, 2012.
- MATOS, M. A.; SALVI, J. V.; MILAN, M. Pontualidade na operação de semeadura e a antecipação da adubação e suas influências na receita líquida da cultura da soja. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.26, n.2, p. 493-501, 2006.
- MEURER, E. J. Fundamentos de química do solo. ed. 3, p. 285, 2006, apud BEZERRA, A., L. L., et al. Influência da calagem na adsorção de fósforo em diferentes solos do estado do Ceará. **Agropecuária Científica No Semiárido**. 9, n. 4, p. 01 - 05, 2013.
- MOHAMMADI, K. Effective factors on biological nitrogen fixation. **African Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 12, p. 1782–1788, 2012.
- MOODY, P.W.; EDWARDS, D.G.; BELL, L.C. Effect of banded fertilizers on soilsolution composition and short-term root growth. II. Mono- and di-ammonium phosphates. **Aust. J. Soil Res.**, n. 33, p. 689–707, 1995.
- MOTOMIYA, W. R. et al. Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 4, p. 307–312, 2004.
- MOTTA, P. E. F. et al, Adsorção e formas de fósforo em latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 349–359, 2002.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution methods for the determination of phosphate in natural Waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.
- NEUMANN, G. & RÖMHELD, V. Rhizosphere Chemistry apud Relation to Plant Nutrition, **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition**, p. 347–368, 2011.
- NKEBIWE, P. M. et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 196, p. 389–401, 2016.
- NOVAIS, R. F. et al. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007.
- OLIBONE D. & ROSOLEM C. A. Phosphate fertilization and phosphorus forms in an Oxisol under no-till. **Sci. Agric.** n. 67, p. 465–471, 2010.
- OYA, T. et al. Drought Tolerance Characteristics of Brazilian Soybean Cultivars - Evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Production Science**, v. 7, n. 2, p. 129–137, 2004.
- PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, n. 30, p. 1-50, 1978.

- PARFITT, R. L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **Journal of Soil Science**, v.40, p. 359-369, 1989, apud RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Cienc. Rural**, v.38, n.2, p. 576-586, 2008.
- PAVINATO, P. S. & CERETTA, C. A. Fósforo e potássio na sucessão trigo / milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, v. 34, n. 6, p. 1779-1784, 2004.
- PEREIRA, J. F. Initial root length in wheat is highly correlated with acid soil tolerance in the field. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 1, p. 79–83, 2018.
- PETER, D. G. et al. Modos de aplicação de fertilizante formulado NPK na cultura da soja em sistema de plantio direto. **Gl. Sci. Technol**, v. 9, n. 1, p. 48 – 55, 2016.
- PRADO, R. M. Efeito residual do calcário sob diferentes modos de incorporação antes da instalação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.478-482, 2003.
- PROCHNOW, L.I. et al. Greenhouse evaluation of phosphorous sources produced from low-reactive Brazilian phosphate rock. **Agron. J.** v. 96, p. 761–768, 2004.
- RAS. Regras para análise de sementes. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília: Mapa/ACS, 2009.
- RHEINHEIMER, D. S. et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 797–805, 2000.
- RHEINHEIMER, D.S. et al. Situação da fertilidade dos solos no estado do Rio Grande do Sul. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2001. 32p. (Boletim Técnico, 1), apud BRUNETTO, G. et al. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29 n. 4, 2005.
- RHEINHEIMER, D. S. et al. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, v. 313, p. 7–16, 2018.
- RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Cienc. Rural**, v.38, n.2, pp.576-586, 2008.
- RITCHEY, K.D.; SILVA, J.E.; COSTA, U.F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savannah Oxisols. **Soil Sci.**, n. 133, p. 378-382, 1982, apud CAIRES, E. F. et al. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 27–34, 1998.

SAUNDERS, W. M.H. The effect of different phosphate fertilisers on soil ph and the consequent effect on phosphate retention. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 1, n. 5, p. 675–682, 1958.

SCHJØRRING, J. K. & NIELSEN, N. E. Root length and phosphorus uptake by four barley cultivars grown under moderate deficiency of phosphorus in field experiments. **J. Plant Nutrition**, v. 10, p. 1289–1295, 1987, apud GAHOONIA, T. S.; CARE, D.; NIELSEN, N. E. Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. **Plant and Soil**, v. 191, n. 2, p. 181–188, 1997.

SCHWARTZ, R.; BAUMHARDT, R.; EVETT, S. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. **Soil Tillage Res.**, n. 110, p. 221–229, 2010, apud HANSEL, F. D. et al. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance, **Agronomy Journal**, v. 109, n. 6, p. 2936–2944, 2017.

SELLES, F. K. R. A. et al. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. **Soil Till Res.**, n. 44, p. 23–34, 1997, apud MACHADO, P. L. O. A. & SILVA, C. A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, n. 1–2, p. 119–130, 2001.

SEWELL, P. L. & OZANNE, P. G. The effect of modifying root profiles and fertilizer solubility on nutrient uptake. Section. ed. 1, p. 6–9, 1970, in Miller, T.C. ed. Proc. Aust. Plant Nutr. Conf. Mt. Gambier, CSIRO, 1970 apud GRANT, C. A. et al. The importance of early season phosphorus nutrition. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 81, n. 2, p. 211–224, 2001.

SLATTERY, A. C. J. F.; COVENTRY, D. R.; SLATTERY, W. J. Publishing Rhizobial ecology as affected by the soil environment. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 41, n. 41, p. 289–298, 2001.

SU, W., et al. Effect of depth of fertilizerbanded-placement on growth, nutrient uptake and yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.). **Eur. J. Agron**, v. 62, p. 38–45, 2015.

TEDESCO, M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. Análises de solo, plantas e outros materiais. UFRGS, 1995

TRES, G. **Distribuição e incremento do fósforo em Latossolo sob três modos de aplicação do fertilizante fosfatado em soja e milho.** 2017, pg. 55 e 57. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon – Paraná.

VALADÃO, F. C. et al. Teor de macronutrientes e produtividade da soja influenciados pela compactação do solo e adubação fosfatada. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 183–195, 2017.

VINCENT, A. G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V.J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. **European Journal of Soil Science**, v. 61, n. 1, p. 48–57, 2010 apud CALEGARI, A. et al. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32–39, 2013.

VON TUCHER, S.; HÖRNDL, D.; SCHMIDHALTER, U. Interaction of soil pH and phosphorus efficacy: Long-term effects of P fertilizer and lime applications on wheat, barley, and sugar beet. **Ambio**, v. 47, p. 41–49, 2018.

WALK, T. C.; VAN ERP, E.; LYNCH, J. P. Modelling applicability of fractal analysis to efficiency of soil exploration by roots. **Annals of Botany**, v. 94, n. 1, p. 119–128, 2004.

WANG, X.; YAN, X.; LIAO, H. Genetic improvement for phosphorus efficiency in soybean: A radical approach. **Annals of Botany**, v. 106, n. 1, p. 215–222, 2010.

WEI, S. Y. et al. Surface properties and phosphate adsorption of binary systems containing goethite and kaolinite. **Geoderma**, v. 213, p. 478–484, 2014.

ZANATTA, A. C. A.; MUNDSTOCK, C. M. Efeito de níveis de fósforo e alumínio sobre os sistemas aéreo e radicular do trigo. **Pesq. Agropcc. Bras.**, v. 23, n.12, pg. 1355-1370, 1988.

ZHANG, M. et al. Localized root growth in soil induced by controlled-release urea granule and barley nitrogen uptake. **J. Plant. Nut.** n. 23, p. 413–422, 2012, apud NKEBIWE, P. M. et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 196, p. 389–401, 2016.

ZHAO, J. Characterization of root architecture in an applied core collection for phosphorus efficiency of soybean germplasm. **Chinese Science Bulletin**, v. 49, n. 15, p. 1611, 2004.