

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO – CIÊNCIA DO SOLO

GILMAR LUIZ MUMBACH

**INCORPORAÇÃO DE FÓSFORO NA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA
DE PLANTIO DIRETO E CALIBRAÇÃO DA ADUBAÇÃO
FOSFATADA DE CORREÇÃO EM SOLOS DO RS E SC**

LAGES

2021

GILMAR LUIZ MUMBACH

**INCORPORAÇÃO DE FÓSFORO NA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA
DE PLANTIO DIRETO E CALIBRAÇÃO DA ADUBAÇÃO
FOSFATADA DE CORREÇÃO EM SOLOS DO RS E SC**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, do Centro de Ciências
Agroveterinárias da Universidade do Estado de
Santa Catarina, como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Dr. Luciano Colpo Gatiboni
Co-orientador: Dr. Paulo Cesar Cassol

LAGES

2021

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Mumbach , Gilmar Luiz

Incorporação de fósforo na implantação do Sistema de Plantio Direto e calibração da adubação fosfatada de correção em solos do RS e SC / Gilmar Luiz Mumbach . -- 2021.
115 p.

Orientador: Luciano Colpo Gatiboni

Coorientador: Paulo Cesar Cassol

Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2021.

1. Disponibilidade de P. 2. Adubação na linha e a lanço. 3. Nutrientes em subsuperfície. 4. Eficiência da adubação fosfatada. I. Gatiboni, Luciano Colpo. II. Cassol, Paulo Cesar . III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

GILMAR LUIZ MUMBACH

**INCORPORAÇÃO DE FÓSFORO NA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE PLANTIO
DIRETO E CALIBRAÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA DE CORREÇÃO EM
SOLOS DO RS E SC**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, do Centro de Ciências
Agroveterinárias da Universidade do Estado de
Santa Catarina, como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Luciano Colpo Gatiboni
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Dr. Paulo Roberto Ernani
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Professor Dr. Gustavo Brunetto
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Dr. Paulo Sérgio Pavinato
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ

Dr. Renan Costa Beber Vieira
Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Lages, 24 de fevereiro de 2021

Dedico este trabalho aos meus pais, Renata Maria Schneider Mumbach e Arsidio João Mumbach, pelo apoio dado durante minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelas oportunidades que vem me proporcionando.

A minha família pelo apoio e carinho nesta etapa e durante toda a minha vida.

A Camila Adaime Gabriel, pelo amor e por estar ao meu lado e me auxiliando neste trabalho.

Ao professor Luciano Colpo Gatiboni, pela orientação e pelos ensinamentos que tem me proporcionado durante a Pós-Graduação.

A todos os membros do Grupo de Estudos do Fósforo em Solos Catarinenses (GEFOSC) pela parceria e pelo apoio durante todas as etapas do trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação do CAV/UDESC pelos ensinamentos e apoio.

A todos os colegas do laboratório de Química e Fertilidade do Solo pelo apoio e amizade.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo pelo apoio e estrutura, bem como à CAPES pela concessão das bolsas de estudo.

A fundação Agrisus pelo apoio financeiro ao projeto de campo.

Enfim, a todos que de uma ou outra forma me apoiaram e me incentivaram ao longo desta caminhada.

RESUMO

Recomenda-se realizar a adubação de correção, total ou gradual, em solos com disponibilidade insuficiente de fósforo (P). A adubação de correção total, na camada de 0-20 cm, pode trazer ganhos em produtividade, especialmente sob condições de déficit hídrico. Em solos conduzidos sob Sistema de Plantio Direto recomenda-se realizar a adubação fosfatada na linha, mas esta vem sendo substituída pela adubação a lanço. Com base no exposto, os objetivos do estudo são: i) avaliar a necessidade de aplicação de P na camada subsuperficial do solo (10-20cm) para manutenção da produtividade das culturas; ii) avaliar a necessidade de aplicação da adubação de reposição na linha semeadura; e iii) quantificar as necessidades de fertilizantes fosfatados para correção de P em solos do RS e SC. O experimento I foi conduzido na fazenda experimental da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages. Foram aplicadas três doses de P (0, 65 e 130 kg ha⁻¹ de P₂O₅) nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm, além de um tratamento adicional com 260 kg ha⁻¹ de P₂O₅, nas mesmas camadas. As aplicações na camada 0-10 foram realizadas em dois modos: a lanço e na linha de semeadura. Foram cultivados entre 2016 e 2020: milho, trigo, soja, aveia-preta, soja, cevada e feijão, com avaliação do rendimento de grãos e outros parâmetros relacionados ao crescimento das plantas. Anualmente, foram realizadas coletas de solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm para avaliar parâmetros químicos do solo. Os resultados demonstraram que a produtividade de grãos aumenta com a adubação fosfatada, com relativa dependência da camada fertilizada. Maior efetividade da adubação subsuperficial ocorreu para as culturas de trigo e soja, enquanto o milho respondeu mais a adubação na camada 0-10 cm. Considerando os rendimentos relativos, os níveis críticos nas camadas 0-10, 10-20 e 0-20 cm foram 22,2, 12,1 e 17,0 mg dm⁻³, respectivamente. A adubação na linha resulta em maiores produtividades de milho e trigo em relação à aplicação na superfície, não havendo diferenças nos demais cultivos. O experimento II foi conduzido no laboratório de química e fertilidade do solo do CAV/UDESC. Foram coletadas 20 amostras de solo no RS e 21 amostras em SC, nas camadas 0-10 e 10-20 cm. Os solos foram caracterizados e incubados por 20 dias com doses de P. Ao final da incubação, foram determinados os valores de P disponível por Mehlich 1 e quantificadas as necessidades de P necessárias para elevar os teores do nutriente no solo em 1 mg dm⁻³ (capacidade tampão de P = CTP). A CTP foi mais alta nos solos com maior conteúdo de argila, porém reduziu de acordo com o aumento da disponibilidade do nutriente no solo. Para solos com mais de 20% de argila os valores de CTP quantificados superam em duas vezes os valores atualmente vigentes na região, enquanto para solos arenosos os valores são similares. Além disso, solos com disponibilidade de P nas classes “muito baixo” e “baixo” apresentam maior tamponamento em relação a solos na classe “médio”. As principais conclusões do trabalho são que a aplicação de P em subsuperfície é uma estratégia eficiente e a aplicação de P na linha garante melhores rendimentos em solos com insuficiente disponibilidade do nutriente. Além disso, o conteúdo de argila e a classe de disponibilidade devem ser consideradas na definição das dosagens para fertilização fosfatada de correção.

Palavras-chave: Disponibilidade de P. Adubação na linha e a lanço. Nutrientes em subsuperfície. Eficiência da adubação fosfatada.

ABSTRACT

It is recommended to carry out the correction fertilization, total or gradual, in soils with insufficient availability of phosphorus (P). Total correction fertilization, in the 0-20 cm layer, can bring productivity gains, especially under water deficit conditions. In soils conducted under no-tillage system, it is recommended to carry out phosphate fertilization in the line, but this is being replaced by fertilization by haul. Based on the above, the objectives of the study are: i) to evaluate the need to apply phosphorus to the subsurface layer of the soil (10-20 cm) to maintain crop productivity; ii) evaluate the need to apply replacement fertilizer in the sowing line; and iii) quantify the needs for phosphate fertilizers to correct P in soils in RS and SC. Experiment I was conducted at the experimental farm at the State University of Santa Catarina (UDESC), in Lages. Three doses of P (0, 165 and 130 kg ha⁻¹ of P₂O₅) were applied in layers 0-10 cm and 10-20 cm, in addition to an additional treatment with 260 kg ha⁻¹ of P₂O₅, in the same layers. The applications in layer 0-10 were carried out in two modes: the haul and the seeding line. Were grown: corn, wheat, soy, black oats, soy, barley and beans, with evaluation of grain yield and other parameters related to plant development. Annually, soil samples were collected in layers 0-10 and 10-20 to assess soil chemical parameters. The results showed that grain productivity increases with phosphate fertilization, with relative dependence on the fertilized layer. Greater effectiveness of subsurface fertilization occurred for wheat and soybean crops, while corn responded more to fertilization in the 0-10 cm layer. Considering the relative yields, the critical levels in layers 0-10, 10-20 and 0-20 cm were 22.2, 12.1 and 17.0 mg dm⁻³, respectively. Fertilization in the line results in higher yields of corn and wheat in relation to surface application, with no differences in other crops. Experiment II was conducted in the CAV / UDESC soil chemistry and fertility laboratory. Twenty soil samples were collected in RS and 21 samples in SC, in layers 0-10 and 10-20 cm. The soils were characterized and incubated for 20 days with doses of P. At the end of the incubation, the available P values were determined by Mehlich 1 and the necessary P needs to increase the nutrient content in the soil by 1 mg dm⁻³ were quantified. (buffer capacity of P = CTP). The CTP was higher in soils with a higher clay content, but decreased according to the increase in nutrient availability in the soil. For soils with more than 20% clay, the quantified CTP values are twice as high as the values currently in force in the region, while for sandy soils the values are similar. In addition, soils with P availability in the “very low” and “low” classes have greater buffering compared to soils in the “medium” class. The main conclusions of the work are that the application of P in subsurface is an efficient strategy and the application of P in the line guarantees better yields in soils with insufficient nutrient availability. In addition, the clay content and availability class should be considered when defining dosages for correction phosphate fertilization.

Keywords: P availability. Banding and broadcast fertilization. Subsurface nutrients. Efficiency of phosphate fertilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da fazenda experimental do CAV/UEDESC (FECAV), em Lages/SC.....	37
Figura 2 - Processo de construção do experimento, compreendo as fases de i) retirada da camada superficial, ii) aplicação do fertilizante fosfatado em subsuperfície, iii) recolocação do solo na camada de 0-10 cm e, finalmente, iv) aplicação do fertilizante fosfatado em superfície, na linha de semeadura ou a lanço.....	39
Figura 3 - Temperaturas médias máxima (Tmax) e mínima (Tmin) e somatório mensal da precipitação (Precipitação), ao longo das safras 2016/2017 (a), 2017/2018 (b), 2018/2019 (c) e 2019/2020 (d), compreendendo o período de condução do experimento.....	41
Figura 4 - Rendimento de grãos em função da adubação fosfatada corretiva realizada nas camadas 0-10 e 10-20 cm, para as culturas do milho (a= 0-10, b= 10-20), trigo (c=0-10, d= 10-20), sojaI (e= 0-10, f= 10-20), cevada (g= 0-10, h= 10-20), feijão (i= 0-10, j= 10-20).....	45
Figura 5 - Rendimento de grãos de sojaII em função da interação entre as doses de adubação fosfatada corretiva aplicadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm.....	47
Figura 6 - Rendimento de grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada, feijão e rendimento acumulado em função da adubação fosfatada realizada na linha de semeadura ou a lanço.....	51
Figura 7 - Percentuais de P recuperado em função das quantidades totais do nutriente aplicadas nas camadas 0-10 (a) e 10-20 cm (b) e em função dos modos de aplicação (c).....	57
Figura 8 - Percentuais de P recuperado, em cada um dos cultivos, em função das quantidades do nutriente aplicadas nas camadas 0-10 (a) e 10-20 cm (b) e em função dos modos de aplicação (c).....	58
Figura 9 - Regressões múltiplas em função da interação entre os teores disponíveis de P disponíveis nas camadas 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b), com base no rendimento de grãos dos cultivos sucessivos.....	63
Figura 10 - Relação entre os teores de P Mehlich 1 avaliados nas camadas 0-10, 10-20 e 0-20 cm e os rendimentos relativos de milho (a), trigo (b), sojaI (c), sojaII (d), cevada (e), feijão (f) e acumulado (g).....	65
Figura 11 - Distribuição espacial dos 41 pontos amostrados nos estados do RS e SC.....	67
Figura 12 - Teores de P extraídos por Mehlich 1 em função da adição de doses de P, após incubação de 20 dias, para os solos do RS.....	80
Figura 13 - Teores de P extraídos por Mehlich 1 em função da adição de doses de P, após incubação de 20 dias, para os solos de SC.....	83
Figura 14 - Agrupamento dos valores de capacidade tampão de fósforo (CTP-2) de acordo com classes de argila (A) e faixas de disponibilidade de fósforo (B).....	92
Figura 15 - Comparação entre as recomendações de adubação fosfatada de correção entre as metodologias adotadas pela CQFS – RS/SC (2016) e a sugerida pelos valores de CTP-2, considerando solos com 0-20 (a), 21-40 (b), 41-60 (c) e >60% de argila (d), de 270 amostras de solo de SC.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regressões múltiplas em função da interação entre as doses de P aplicadas nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm, com base no rendimento de grãos obtido nos diferentes cultivos.....	47
Tabela 2 - Peso de 1000 grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada e feijão em função de doses de correção de P aplicadas nas camadas de 0-10 e 10-20 cm.....	52
Tabela 3 - Peso de 1000 grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada e feijão em função da adubação fosfatada na linha de semeadura e a lanço.....	52
Tabela 4 - Regressões múltiplas em função da interação entre as doses de P aplicadas nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm, com base no peso de 1000 grãos obtido nos diferentes cultivos.....	53
Tabela 5 - Concentração e quantidade de P exportado pelos grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada e feijão, em função das doses de correção de P aplicadas nas camadas de 0-10 e 10-20 cm.....	54
Tabela 6 - Quantidades de P exportado pelos grãos de trigo e sojaII em função de efeito de interação entre as doses de correção de P aplicadas nas camadas de 0-10 e 10-20 cm.....	55
Tabela 7 - Regressões múltiplas em função da interação entre as doses de P aplicadas nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm, considerando a concentração nos grãos e a quantidade de P exportado pelos diferentes cultivos.....	56
Tabela 8 - Concentração e quantidade de P exportado pelos grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada e feijão em função da adubação fosfatada na linha de semeadura e a lanço.....	56
Tabela 9 - Balanço de P no solo (Total aplicado – Total exportado) ao final do estudo, em função das doses de P aplicadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm.....	57
Tabela 10 - Disponibilidade de P nas amostras de solo coletadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm, nas quatro coletas realizadas.....	61
Tabela 11 - Valores de pH-H ₂ O e Ca trocável nas amostras de solo coletadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm, nas quatro coletas realizadas.....	62
Tabela 12 - Correlações entre o rendimento de grãos e as quantidades de aplicadas e as quantidades de P disponíveis no solo nas camadas 0-10, 10-20 e 0-20 cm, considerando todos os cultivos realizados.....	64
Tabela 13 - Classificação e localização dos solos coletados nos estados do RS e de SC.....	74
Tabela 14 - Valores de pH H ₂ O e H+Al naturais dos solos e as necessidades de calagem (NC) estimadas pelo H+Al e as obtidas por incubação, nos solos coletados nas camadas 0-10 e 10-20 cm, no estado do RS.....	67
Tabela 15 - Valores de pH H ₂ O e H+Al naturais dos solos e as necessidades de calagem (NC) estimadas pelo H+Al e as obtidas por incubação, nos solos coletados nas camadas 0-10 e 10-20 cm, no estado de SC.....	69

Tabela 16 - Conteúdos de argila, silte e areia, determinados pelo método da pipeta, dos solos coletados nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, nos estados do estado do RS e de SC.....	71
Tabela 17 - Valores de Ca e Mg trocáveis, K disponível, CTC pH 7, COT, P disponível, Prem, CMAP e <i>k</i> nas camadas de 0-10 e 10-20 cm dos 20 solos coletados no estado do RS.....	74
Tabela 18 - Valores de Ca e Mg trocáveis, K disponível, CTC pH 7, COT, P disponível, Prem, CMAP e <i>k</i> nas camadas de 0-10 e 10-20 cm dos 20 solos coletados no estado de SC.....	74
Tabela 19 - Agrupamento dos solos em função da CMAP e doses de P utilizadas na incubação dos solos coletados no RS e em SC.....	76
Tabela 20 - Teores de P extraídos por Mehlich 1 em função da adição de doses de P e os valores de CTP-1 das amostras de solos coletados nos estados do RS e SC.....	88
Tabela 21 - Correlação entre as variáveis analisadas, para as camadas 0-10 e 10-20 cm, considerando o conjunto de solos coletados nos estados do RS e SC.....	89
Tabela 22 - Valores de CTP-2 em função de classes de argila e faixas de disponibilidade de fósforo para recomendação de adubação fosfatada de correção nos solos do RS e SC.....	93
Tabela 23 - Doses de P (P ₂ O ₅) para adubação de correção total, considerando o conteúdo de argila e os teores disponíveis de P no solo.....	94

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1 - Concentração e quantidades de P exportado pelos grãos de milho, trigo e soja em função da adubação fosfatada na linha de semeadura e a lanço na superfície do solo.....	110
Apêndice 2 - Valores de H+Al e Al ³⁺ nas amostras de solo coletadas nas quatro coletas, nas camadas 0-10 e 10-20 cm.....	110
Apêndice 3 - Mg e K nas amostras de solo coletadas nas quatro coletas, nas camadas 0-10 e 10-20 cm.....	110
Apêndice 4 - CTC _{pH7} e saturação por bases (V%) nas amostras de solo coletadas nas quatro coletas, nas camadas 0-10 e 10-20 cm.....	111
Apêndice 5 - Conteúdos de Fe e Al total, Fe e Al de baixa cristalinidade (BC) e Fe e Al de alta cristalinidade (AC), extraídos dos solos coletados no estado do RS.....	111
Apêndice 6 - Relação entre as doses de P e os teores disponíveis extraídos por M-1 e valores de CTP considerando disponibilidades iniciais nas faixas “muito baixo”, “baixo” e “médio” dentro das classes de argila, para os solos coletados no RS e em SC.....	112
Apêndice 7 - Relações estatísticas entre as doses de P aplicada e os percentuais de P recuperado, bem como o valor de máximo P recuperado (MPR), nos 20 solos coletados no estado do RS.....	114
Apêndice 8 - Relações estatísticas entre as doses de P aplicada e os percentuais de P recuperado, bem como o valor de máximo P recuperado, nos 22 solos coletados no estado de SC.....	114
Apêndice 9 - Correlação entre o conteúdo de argila e o valor máximo de P recuperado (MPR), considerando o conjunto de solos coletados nos estados do RS e SC.....	115

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 HIPÓTESES	16
3 OBJETIVOS	16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1 FORMAS E DINÂMICA DO P NO SOLO.....	16
4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A DISPONIBILIDADE DE P FORO NO SOLO.....	20
4.3 ESTRATÉGIAS PARA MELHORAR O APROVEITAMENTO DO P.....	24
4.4 MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA COM ÊNFASE AOS ESTADOS DO RS E SC.....	27
4.5 MODOS DE APLICAÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO.....	32
4.6 INFLUÊNCIA DA DISPONIBILIDADE DE P NO CRESCIMENTO RADICULAR DAS PLANTAS.....	35
5 EXPERIMENTO 1. CONSTRUÇÃO DE PERFIL DE P EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO	37
5.1 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
5.1.1 Caracterização do local de implantação do experimento.....	37
5.1.2 Construção dos níveis de fertilidade e descrição dos tratamentos.....	38
5.1.3 Implantação e condução das espécies cultivadas.....	40
5.1.4 Obtenção de dados.....	42
5.1.5 Cálculos e correlações.....	42
5.1.6 Análise estatística.....	44
5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5.2.1 Rendimento de grãos.....	44
5.2.2 Peso de 1000 grãos.....	51
5.2.3 Concentração e exportação de P pelos grãos.....	53
5.2.4 Balanço de P e percentuais de P recuperado.....	56
5.2.5 Atributos químicos do solo.....	60
5.2.6 Relação entre os teores de P no solo e o rendimento de grãos.....	69
5.3 CONCLUSÕES.....	66
6 EXPERIMENTO 2. VARIAÇÃO DO TAMPONAMENTO DE P EM SOLOS DE TEXTURA E NÍVEIS DE FERTILIDADE CONTRASTES DO RS E SC	67
6.1 MATERIAL E MÉTODOS.....	67
6.1.1 Coleta dos solos.....	67
6.1.2 Caracterização das amostras de solo coletadas.....	68
6.1.3 Determinação da capacidade tampão de P em solos do RS e SC.....	75
6.1.4 Recomendação de adubação de correção total com base nos valores de CTP.....	78
6.1.5 Análise estatística.....	79
6.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
6.2.1 Visualização geral.....	79
6.2.2 Capacidade tampão de P (CTP) e parâmetros relacionados ao solo.....	87
6.2.3 Variações da CTP em função da argila e da disponibilidade inicial de P.....	91
6.2.4 Ajustes nas doses de adubação fosfatada corretiva para solos do RS e SC.....	93
6.3 CONCLUSÕES.....	97
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
9. APÊNDICES	110

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um nutriente requerido pelas plantas em quantidades inferiores a outros macronutrientes, como nitrogênio (N) e potássio (K). Contudo, pode representar o principal limitante ao rendimento das culturas agrícolas. Grande parte do P adicionado pelos fertilizantes é retido no solo, tornando-se, com o passar do tempo, indisponível às plantas (GATIBONI et al., 2008; FRAZÃO et al., 2019). Em função da baixa eficiência no solo, torna-se necessária a aplicação de fertilizantes fosfatados em dosagens muito próximas ou superiores aos demais macronutrientes primários (CQFS – RS/SC, 2016), além de exigir cuidados específicos quanto às formas de aplicação (NOVAIS; SMYTH, 1999; NKEBIWE et al., 2016).

A elevada afinidade do P a constituintes sólidos do solo exige a adoção de práticas de manejo adequadas para boa resposta da adubação fosfatada, com destaque para as quantidades adicionadas em diferentes situações de disponibilidade no solo e formas de aplicação dos fertilizantes. As quantidades adicionadas nos solos do RS e SC seguem as recomendações propostas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS – RS/SC), apresentadas no manual de calagem e adubação (CQFS – RS/SC, 2016). De acordo com as recomendações, em solos cuja disponibilidade de P se encontra nas faixas “muito baixo”, “baixo” e “médio”, ou seja, abaixo do nível crítico (NC), deve-se realizar a adubação de correção, objetivando elevar a disponibilidade do nutriente à faixa adequada, independentemente das quantidades aplicadas para satisfazer as necessidades da espécie vegetal de interesse. Quando a disponibilidade do nutriente estiver nas classes “alto” e “muito alto”, a adubação é baseada predominantemente na demanda das plantas. Em termos gerais, um solo que parte de classes de disponibilidade insuficientes até condições com alta disponibilidade, através de um histórico de adubação, poderá receber cada vez menos P, em função da redução do potencial de adsorção do solo (SANTOS et al., 2003; ROY et al., 2017), refletindo-se em aumento de eficiência da adubação (ALVAREZ; FONSECA, 1990; RHEINHEIMER et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2018; MUMBACH et al., 2020).

A faixa de disponibilidade de P no solo que exige maior atenção é na qual os teores do nutriente se encontram abaixo do nível crítico. Nesta condição, recomenda-se realizar a adubação de correção, elevando a disponibilidade do nutriente até a faixa “alto”. A adubação corretiva pode ser realizada de modo total ou gradual. A adubação de correção total baseia-se na aplicação e incorporação de toda a quantidade recomendada na camada arável do solo, de 0-20 cm. A adubação de correção gradual, predominantemente utilizada nos estados do RS e SC, consiste na aplicação parcelada da quantidade de fertilizante recomendada, normalmente em

duas épocas, e é realizada juntamente à adubação de base, na linha de semeadura (CQFS – RS/SC, 2016). A correção gradual, apesar de menos onerosa, restringe a camada fertilizada aos 10 cm superficiais do solo (NUNES et al., 2011). A adição de P em maior profundidade, como a realizada pela adubação de correção total, pode ser vantajosa às plantas. Resultados de campo indicam que altas produtividades estão diretamente relacionadas à presença de P na camada de 10-20 cm, ou seja, mesmo com a presença de teores adequados na camada 0-10 cm, as produtividades podem ser limitadas pela reduzida disponibilidade de P em camadas subsuperficiais (SANTOS et al., 2008a; OLIVEIRA JUNIOR; CASTRO, 2013; BARBOSA et al., 2015). Como principal desvantagem da correção total destaca-se o elevado custo de realização, em função das elevadas quantidades de fertilizante aplicadas e à necessidade de revolvimento mecânico do solo.

As quantidades de P atualmente recomendadas para a adubação de correção são 160, 80 e 40 kg de P_2O_5 ha⁻¹ para solos com disponibilidade do nutriente nas classes “muito baixo”, “baixo” e “médio”, respectivamente (CQFS – RS/SC, 2016). Esses valores consideram uma maior capacidade de tamponamento do solo quando este se encontra na faixa de disponibilidade “muito baixo”. Os valores recomendados podem ser satisfatórios em sistemas conservacionistas do solo, em que não há incorporação dos fertilizantes e, conseqüentemente, a quantidade de solo em contato com os grânulos de adubo é reduzida. Contudo, podem ficar abaixo da real necessidade do solo em situações em que é realizado o revolvimento do solo para incorporação dos fertilizantes, especialmente em solos com elevada capacidade de adsorção (GATIBONI et al., 2019). A maior necessidade de P em decorrência da mobilização do solo, já observada em outros trabalhos (ROGERI, 2013), decorre do contato dos grânulos do adubo com maior volume de solo e da quebra de agregados do solo e conseqüente exposição de sítios de adsorção de P antes protegidos, elevando a capacidade sortiva do solo, em comparação ao mesmo solo porém sob SPD (GATIBONI et al., 2019).

Nos solos cultivados sob SPD, a adubação fosfatada de manutenção ou reposição normalmente é realizada na linha de semeadura. A adubação localizada minimiza o contato entre o fertilizante e as partículas de solo, reduzindo a quantidade de nutriente adsorvido (KLEPKER; ANGHINONI, 1995; SOUSA; REIN, 2011; NKEBIWE et al., 2016). Apesar das vantagens que a adubação fosfatada na linha apresenta, muitos agricultores vêm a substituindo pela aplicação a lanço, na superfície do solo. A adoção dessa prática provém da eliminação do compartimento para fertilizantes nas semeadoras atualmente comercializadas, apresentando como principal vantagem maior agilidade no processo de implantação das culturas (NUNES et al., 2011; FRANCISCO; CÂMARA, 2013). No entanto, em solos onde os teores de P estão

abaixo dos níveis considerados adequados, há riscos de prejuízos ao crescimento e rendimento das espécies agrícolas, principalmente em anos com déficit hídrico, em razão do baixo crescimento vertical de raízes quando o P é aplicado na superfície do solo (KANG et al., 2014), além de potenciais perdas por escoamento superficial (FISCHER et al., 2018; DALL'ORSOLETTA et al., 2021).

2 HIPÓTESES

A adubação fosfatada em subsuperfície resulta em maior rendimento de espécies agrícolas anuais, especialmente em anos com restrição hídrica.

A adubação na linha permite maiores rendimentos de culturas agrícolas, em comparação à adubação a lanço, em condições de insuficiência de P na camada de 10-20 cm.

Com adição de P na camada 10-20 cm os modos de aplicação, na linha e a lanço, apresentam rendimentos agrícolas similares.

As quantidades de P atualmente recomendadas para a adubação de correção, nos solos do RS e SC, são insuficientes.

3 OBJETIVOS

Avaliar a efetividade técnica da elevação dos níveis de P nas camadas 0-10 e 10-20 cm e modos de aplicação da adubação fosfatada sobre a produtividade e outros parâmetros biométricos de culturas agrícolas anuais.

Quantificar as dosagens necessárias para adubação de correção de fósforo em solos do RS e SC com diferentes níveis iniciais do nutriente e textura contrastante.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 FORMAS E DINÂMICA DO P NO SOLO

O P é um nutriente essencial e sua baixa disponibilidade no solo resulta em limitação ao rendimento das plantas (SOUSA; REIN, 2009). Apesar de ser absorvido e estar presente nas plantas em menores quantidades em relação a N e K (HAVLIN et al., 2013), a adubação fosfatada é exigida em quantidades similares a estes macronutrientes (CQFS – RS/SC, 2016), muito em função da alta capacidade do P de se adsorver a constituintes sólidos do solo (NOVAIS; SMYTH, 1999; CHIEN et al., 2014). Na planta o P participa de importantes processos, como a transferência de energia, síntese de ácidos nucléicos, glicólise, respiração,

dentre outros (ARAÚJO; MACHADO, 2006), sendo componente de moléculas como os ácidos nucleicos e fosfolipídios, atuando na divisão celular e reprodução das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A forma natural de fornecimento de P às plantas é o solo, através do intemperismo de minerais. As principais fontes de P no solo são minerais primários, com destaque para as apatitas (WALKER; SYERS, 1976). Contudo, em solos com grau avançado de intemperismo, como os que predominam no Sul do Brasil (ALMEIDA et al., 1999), a grande maioria das fontes primárias existentes já sofreu transformação.

Com o avanço do intemperismo, a mineralogia do solo sofre alterações, com redução da participação de minerais primários e aumento do predomínio de minerais secundários, estes representados principalmente por minerais 1:1 e óxidos (BORTOLUZZI et al., 2015). Ao mesmo tempo, ocorre redução do número de cargas elétricas negativas de superfície e aumento da eletropositividade (WENG et al., 2012). Neste cenário o solo, que no início de sua formação atuava como fonte de P às plantas, passa a atuar como dreno (NOVAIS; SMYTH, 1999; HOPKINS; HANSEN, 2019), “competindo” com o nutriente disponibilizado.

Mesmo podendo apresentar elevados valores totais de P, solos intemperizados apresentam uma reduzida fração deste nutriente em formas capazes de serem absorvidas pelas plantas (WALKER; SYERS, 1976). Neste cenário, a baixa disponibilidade de P disponível exige reposição via fertilização para atender a demanda de plantas, especialmente as de ciclo curto. Em sistemas naturais, caracterizados por cultivos de ciclo mais longo e sem adubação, a baixa demanda de P das plantas (CQFS – RS/SC, 2016) é atendida pela mineralização de formas orgânicas do nutriente e processos de reciclagem (GATIBONI et al., 2017).

O P presente no solo pode ser compartimentalizado em orgânico (Po) e inorgânico (Pi) (SANTOS, et al., 2008a), podendo ambas as formas contribuir à nutrição das plantas. As plantas, contudo, absorvem apenas formas inorgânicas, sendo necessária a prévia mineralização do Po. As formas de P absorvidas pelas plantas são H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} , com a predominância de uma ou outra sendo determinada pelo pH do solo. A forma H_2PO_4^- é a absorvida em maior quantidade, muito em função de predominar em solos sob pH ácido (HAVLIN et al., 2013).

Os valores de Po no solo variam entre 20 e 80% (RAGHOTHAMA, 1999). Essa fração é originária de restos de tecidos vegetais e animais incorporados ao solo. Boa parte desse compartimento de P é constituído por fosfatos de inositol, monoésteres, que compreendem 10 a 80% do P orgânico total (SANTOS et al., 2008a). As formas orgânicas de monoésteres ocorrem em maior proporção devido a maior estabilidade química. As formas diéster, representadas por ácidos nucleicos e fosfolipídios, apresentam maior suscetibilidade à

decomposição microbiana, com menor interação com partículas de solo (BARBER, 1995). Uma fração de Po importante no solo e importante à nutrição das plantas é a presente na biomassa microbiana, que é rapidamente ciclada através de processos de imobilização e mineralização (GATIBONI et al., 2008). O conteúdo de Po do solo apresenta relação direta com a quantidade de matéria orgânica (COSTA et al., 2010; BOIT et al., 2018). Em termos de participação na nutrição vegetal, o Po tem sua importância aumentada sob condições nas quais não são adicionadas fontes externas, orgânicas e/ou inorgânicas, de P (GATIBONI et al., 2007) e em solos com avançado grau de intemperismo (CROSS; SCHLESINGER, 1995).

O Pi representa de 10 e 96% do P total no solo. Fazem parte desta fração o P presente nos minerais, especialmente os primários, bem como o P adsorvido a minerais ou a outros elementos. Uma importante fração do P se encontra ligada a minerais do tipo 1:1 e óxidos, respectivamente nos grupos funcionais silanol e aluminol e nos radicais R-OH (RAIJ, 2011). O P apresenta elevada afinidade a cátions como ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca). A ligação do P com esses cátions é de caráter covalente, seja por precipitação ou adsorção específica (NOVAIS; SMYTH, 1999). A proporção dos compostos inorgânicos de P ligados a Fe, Al e Ca é condicionada pelo pH e pelo tipo e quantidade de minerais existentes na fração argila. Em solos ácidos predominam combinações de P com os íons Al e Fe, enquanto em solos neutros e alcalinos predominam fosfatos ligados a Ca (SANTOS et al., 2008a). A solubilidade dos fosfatos de Fe e de Al aumenta com a elevação do pH, enquanto a solubilidade do fosfato de Ca eleva-se à medida que o solo se torna mais ácido (HESTERBERG, 2010). Desta forma, no caso da existência simultânea de vários compostos de P, a maior solubilidade encontra-se em valores de pH em torno de 6,0, faixa esta preconizada como ideal para o cultivo agrícola.

O P adicionado ao solo na forma de fertilizantes, independentemente da fonte utilizada, dissolve-se e passa para a solução do solo. De acordo com a literatura, o valor de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de P é considerado padrão na solução do solo, porém sua disponibilidade é altamente regulada pela interação com as superfícies orgânicas e inorgânicas do solo (RAGHOTHAMA, 1999). Desta forma, o valor ótimo às plantas varia de acordo com o tipo de solo (NOVAIS; SMYTH, 1999). Devido à baixa solubilidade dos compostos de P formados no solo e à forte tendência de adsorção, a maior parte do elemento permanece na fase sólida, inicialmente em ligações fracas, ainda disponível às plantas. Em questão de horas e/ou dias após a adubação, grande parte do P, se não absorvido pelas plantas, é adsorvido e entra num processo de “envelhecimento”, passando gradualmente para formas de menor disponibilidade (NOVAIS; SMYTH, 1999; GATIBONI et al., 2008). Desta maneira, com o passar do tempo, fosfatos solúveis adicionados ao solo vão adquirindo constituição mineralógica mais estável e de mais difícil solubilização

(BARRON et al., 1988; ABDALA et al., 2015). A magnitude dessa redução da fração disponível e transformação em formas não-lábeis é influenciada em grande parte pelos teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al e pelo conteúdo de argila (ERIKSSON et al., 2015; ERNANI, 2016).

A partir da aplicação do fertilizante no solo, o P passa por etapas que condicionam sua disponibilidade às plantas. Devido à alta afinidade do P a constituintes sólidos do solo, grande parte do elemento adicionado é retido ao solo sob diferentes níveis de energia. Dentre os mecanismos que controlam a disponibilidade de P no solo se destacam a adsorção, eletrostática e específica, a precipitação e a difusão nos microporos presentes em oxihidróxidos de Fe e Al (HESTERBERG, 2010). Inicialmente o P adicionado se liga por atração eletrostática a compostos com carga oposta, como minerais de Fe e/ou Al, sendo esta uma fração considerada ainda lábil à planta. Posteriormente, o fosfato passa a se adsorver especificamente, sendo esta uma etapa mais lenta e que leva à indisponibilidade do nutriente às plantas. Nesta fase a adsorção ocorre por troca de ligantes entre um metal e o fosfato, podendo esta ligação ser monodentada, bidentada ou binucleada, em ordem crescente de força de ligação e decrescente em termos de disponibilidade às plantas (NOVAIS; SMYTH, 1999). As ligações monodentada e bidentada são representadas pela ligação de um e dois oxigênios do fosfato com o metal, respectivamente, enquanto a ligação binucleada ocorre com a ligação de dois oxigênios do fosfato a dois átomos do metal (GOLDBERG; SPOSITO, 1985). Na troca de ligantes, hidroxilas ou moléculas de água que se encontram coordenadas com cátions, como Fe e Al, da superfície de minerais, são deslocados pela molécula de fosfato (SOUSA et al., 2016).

Adicionalmente, de acordo com Parfitt (1978), o processo de adsorção do P pode ser dividido em estágios: inicialmente ocorre a atração eletrostática, com neutralização das cargas positivas; no segundo estágio ocorre a troca de ligantes entre o P e algum metal; no último estágio ocorrem ligações de caráter físico, com a penetração do P nas imperfeições dos minerais. A penetração do P nos espaços porosos dos minerais é um processo lento e que contribui com a maior irreversibilidade do nutriente (BARROW 2015; BARROW e DEBNATH, 2018).

Além da adsorção específica do P a minerais, a retenção do P no solo também é condicionada pela formação de precipitados. A precipitação consiste em uma reação entre íons, cujo resultado é a formação de um novo composto, onde o P se liga às formas iônicas de Al e Fe em solos ácidos e a Ca em solos de pH alcalino (ERNANI, 2016). A formação de precipitados ocorre principalmente ao redor dos grânulos de fertilizantes, durante sua dissolução, pois é ultrapassado o produto de solubilidade de componentes da reação solo-

fertilizante (NOVAIS; SMYTH, 1999). Desta forma, a ocorrência de precipitados está condicionada, principalmente, a regiões do solo com elevada concentração de P, enquanto a adsorção específica predomina no restante do solo, em regiões com menores concentrações do elemento (BARBER, 1995; HAVLIN et al., 2013).

O P presente no solo também pode ser compartimentalizado quanto à sua disponibilidade ou labilidade, em no mínimo três grandes grupos: P lábil, moderadamente lábil e não lábil. O compartimento de P lábil, seja na forma orgânica ou inorgânica, encontra-se ligado fracamente ao solo e é o principal responsável por tamponar a solução do solo (GATIBONI et al., 2017; BOITT et al., 2018; NUNES et al., 2020). Solos submetidos a adubações frequentes tendem a ter aumentada a participação de formas lábeis no conteúdo total de P (COUTO et al., 2015). Essa fração normalmente representa apenas uma pequena porção do total de P presente no solo, principalmente em solos intemperizados e de elevada capacidade de adsorver P (FRAZÃO et al., 2019; NUNES et al., 2020). As formas de moderada labilidade, e em menor escala as não-lábeis, tamponam parcialmente o compartimento lábil, podendo representar uma parcela importante do P total (RHEINHEIMER et al., 2000; GATIBONI et al., 2007). Com a absorção pelas plantas e contínuo esgotamento da fração mais solúveis, formas de menor labilidade participam da nutrição das plantas (GATIBONI et al., 2007). As frações moderadamente e não lábeis representam os maiores compartimentos no solo (COUTO et al., 2015; BOITT et al., 2018; NUNES et al., 2020) e sua participação na nutrição de plantas, quando ocorre, não é suficiente para atender a demanda de espécies agrícolas anuais, podendo ocorrer apenas em longo prazo e em solos com disponibilidade de P extremamente baixa (NOVAIS; SMYTH, 1999). Em solos altamente intemperizados, como os Latossolos, a fração não lábil pode representar até 90% do total de P presente (FRAZÃO et al., 2019).

4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A DISPONIBILIDADE DE P NO SOLO

Os fertilizantes fosfatados, em solos com disponibilidade insuficiente do nutriente, apresentam baixa eficiência, fato este associado ao forte dreno exercido pelo solo (DOYDORA et al., 2016; NKEBIWE et al., 2016; VOLF; ROSOLEM, 2020). O número de sítios de adsorção de P no solo apresenta relação direta com a quantidade de óxidos e de argila (ERNANI, 2016). A quantidade de P considerada disponível no solo (P lábil) é influenciada pelo grau de intemperismo do solo, textura, mineralogia predominante, conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS), pH, dentre outros fatores (BORTOLUZZI et al., 2015).

A textura do solo apresenta forte influência na retenção de P no solo, especialmente devido à fração argila. Solos mais argilosos possuem maior capacidade de adsorver especificamente o P (BARBIERI et al., 2013; VOLF; ROSOLEM, 2020). O maior conteúdo de argila resulta em maior reatividade química do solo e vem acompanhado normalmente por maiores quantidades de elementos como Fe e Al, aumentando a adsorção de P (FINK et al., 2014; BORTOLUZZI et al., 2015; ERIKSSON et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2020a). Solos arenosos apresentam menor capacidade de adsorver P, o que eleva a eficiência de aproveitamento do nutriente, mas também aumenta a chance de poluição ambiental sob adubações pesadas (GUARDINI et al., 2012; GATIBONI et al., 2015, 2020). Devido a isso, a recomendação de adubação fosfatada, em muitas situações, leva em consideração o conteúdo de argila do solo. A Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos estados do RS e SC (CQFS – RS/SC, 2016) utiliza o conteúdo de argila como critério para interpretação da disponibilidade de P no solo (CQFS – RS/SC, 2016). Isso ocorre devido à migração de grande parte do fertilizante fosfatado aos sítios de adsorção presentes na argila, bem como pela perda de capacidade de extração pelo método Mehlich 1, oficialmente utilizado nos dois estados (FREITAS et al., 2013). Contudo, a recomendação da adubação fosfatada baseada apenas no conteúdo de argila pode ser limitante, por não considerar a composição mineralógica do solo (FINK et al., 2014; ROGERI et al., 2016).

A mineralogia do solo, mais especificamente os minerais presentes na fração argila, apresentam forte influência na disponibilidade e grau de adsorção do P ao solo. Nos solos do Sul do Brasil predominam os minerais filossilicatos do tipo 1:1 (como caulinita), 2:1 (como vermiculita e montmorilonita), 2:1 com hidróxi-Al entre camadas e óxidos de Fe e Al (OLIVEIRA et al., 2020a). A caulinita é um dos minerais predominantes em boa parte dos solos agrícolas da região Sul, porém apresenta reduzida capacidade de reter P, muito em função da baixa presença de sítios de adsorção (CESSA et al., 2009). Porém, de acordo com Antonangelo et al. (2020), a caulinita pode representar 50% dos minerais em muitos solos e, além disso, pode representar sim um importante dreno de P, especialmente quando os sítios dos óxidos já estão total ou parcialmente saturados com o nutriente. Os óxidos de Fe predominantes nos solos do Sul do Brasil são a hematita e a goethita. A hematita, responsável pela coloração avermelhada dos solos, ocorre de forma mais comum em solos bem intemperizados, de baixa altitude, sendo uma forma bem cristalinizada. A goethita, responsável pela coloração brunada dos solos (ALMEIDA et al., 2003), é encontrada em solos bem intemperizados, porém com drenagem mais lenta e maior acúmulo de matéria orgânica, em regiões de maior altitude, sendo uma forma amorfa, menos cristalinizada (BORTOLUZZI et al., 2015).

A fração oxídica apresenta forte influência na adsorção de P no solo (ROLIM NETO et al., 2004; ERIKSSON et al., 2015). A participação dos óxidos de Fe e Al na adsorção de P aumenta em solos com maior grau de intemperismo. Óxidos de Fe, formas predominantes nos solos do Sul do país em relação aos de Al, ocorrem naturalmente em várias formas de cristalinidade, como hematita, goethita, ferrihidrita e lepidocrocita, sendo todas importantes na adsorção de P; contudo, ocorrem em maior quantidade no solo apenas as duas primeiras. A elevada afinidade dos óxidos com o P é devida a estes apresentarem elevada área superficial específica (ROLIM NETO et al., 2004; HESTERBERG, 2010; FINK et al., 2014) e ocorrência de cargas positivas em valores de pH ácido (MOTTA; MELO, 2019). Goldberg et al. (1996), caracterizando alguns minerais com o intuito de quantificar a influência na adsorção de molibdênio, observaram valores de ASE crescente para os minerais caulinita, hematita, gibsitita e goethita, com valores bastante expressivos quando foram consideradas formas amorfas destes dois últimos. Além disso, os autores apresentaram o ponto de carga zero (PCZ) de alguns desses minerais: enquanto os valores para caulinita ficaram abaixo de 3,0, as formas oxídicas apresentaram valores que variaram de 7,2 a 9,4, indicando o predomínio de cargas positivas dos óxidos em solos de pH ligeiramente ácidos. A presença de sítios reativos, como os grupos silanol e aluminol, ocorre em toda a superfície dos óxidos, diferentemente do que ocorre com minerais do tipo 1:1 (WEN et al., 2014). Dentre os óxidos de Fe de maior ocorrência, a goethita apresenta a maior capacidade de adsorção de P, muito em função da maior área superficial específica (ALMEIDA et al., 2003; CESSA et al., 2009; FINK et al., 2014; BORTOLUZZI et al., 2015) e ocorrência de grupos de coordenação simples de hidroxilas, importantes na retenção do nutriente, em todas as faces do mineral (BARRÓN; TORRENT, 1996). Além disso, a substituição isomórfica de Fe pelo Al nos óxidos de Fe, que pode reduzir o tamanho das partículas do mineral, é mais comum em goethita que em hematita (PARFITT, 1978; ROLIM NETO et al., 2004).

A matéria orgânica do solo (MOS) influencia a disponibilidade de P no solo. O aumento do conteúdo dessa fração, além dos benefícios à qualidade física e biológica do solo, contribui com a maior disponibilidade de P (YANG et al., 2019). Sob condições de solo que permitam a adequada atividade dos microrganismos, parte da matéria orgânica é mineralizada e disponibiliza P. O aumento do conteúdo de MOS também pode garantir uma menor retenção de P no solo, devido à liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, os quais competem com o P pelos sítios de adsorção (ALMEIDA et al., 2003; BARBIERI et al., 2013; BORTOLUZZI et al., 2015). A efetividade da competição dos ácidos orgânicos com os sítios de adsorção de P depende da adição continuada de resíduos orgânicos frescos bem como do

grau de sortividade do solo (HUE, 1991). Na camada superficial de solos sob cultivo conservacionista, a eficiência dos fertilizantes deve ser aumentada, muito em função da presença de maior conteúdo de matéria orgânica (SANTOS et al., 2003). De acordo com Pavinato et al. (2008), a presença de ácidos orgânicos no solo aumenta o acúmulo de P inorgânico nas frações lábeis e moderadamente lábeis, principalmente nos cinco centímetros mais superficiais, frações estas de grande importância à nutrição das plantas. O efeito benéfico de redução da adsorção de P pelo aumento da MOS tende a ser mais significativo em solos com predomínio de hematita, sendo menos significativo quando predominam goethita e gibsitita, os quais apresentam maior afinidade com o P e menor com os ácidos orgânicos (FINK et al., 2016). Efeitos mais significativos da adição de compostos húmicos também ocorrem em condições de maior acidez do solo, devido à protonação dos minerais (BECK et al., 2018).

Sob o ponto de vista negativo, o maior conteúdo de MOS pode induzir, a longo prazo, a condições que favoreçam a formação de formas menos cristalinizadas de óxidos de Fe, como a goethita (ABDALA et al., 2015; BORTOLUZZI et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2020a). Além disso, em alguns casos as cargas negativas da superfície da MOS podem servir de ponte para a ligação de íons de Fe e/ou Al, aumentando assim o potencial de retenção de P, através do fenômeno de complexação (HESTERBERG, 2010; ERNANI, 2016). Yang et al. (2019), adicionando quantidades de ácidos húmicos em solo da China, observaram que o aumento do conteúdo de MOS aumenta a capacidade máxima de adsorção e, ao mesmo tempo, traz benefícios como o maior conteúdo disponível de P, menor energia de ligação do nutriente com os sítios de adsorção e maior taxa de dessorção.

O pH influencia o grau de sortividade e as formas de P presentes no solo (ERNANI et al., 1996; NOVAIS; SMITH, 1999). Sob condições de acidez, o solo apresenta um menor potencial de cargas elétricas negativas e, conseqüentemente, maior capacidade de adsorver ânions, como o P (WENG et al., 2012; ERNANI, 2016). Além disso, mesmo que não influencie de forma significativa os valores de capacidade máxima de adsorção de P, a acidez pode resultar em ligações P:partículas de solo mais fortes, com maior energia de ligação (NOVAIS; SMITH, 1999; BROGGI et al., 2011; ABDALA et al., 2015). Tanto a adsorção específica como a precipitação são influenciadas pelo pH do solo. Em solos ácidos o P é adsorvido a óxidos de Fe/Al e/ou precipitado como P-Fe e P-Al, enquanto em solos neutros ou calcários o P pode ser adsorvido em carbonatos de Ca e/ou precipitado como P-Ca (HAVLIN et al., 2013). Considerando a variação da atividade e disponibilidade das formas de P em função do pH, o ideal é manter os valores entre 6-6,5, otimizando assim a quantidade do nutriente passível de ser absorvido pelas plantas (HAVLIN et al., 2013).

A quantidade de P extraível no solo e considerada disponível às plantas tem forte interação com a quantidade total de sítios de adsorção. Em solos com elevada capacidade de adsorção, menores quantidades de P na solução do solo podem ser consideradas satisfatórias às plantas (HAVLIN et al., 2013). O número total de sítios de adsorção pode ser medido pela capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) (NOVAIS; SMITH, 1999). Seu valor apresenta correlação positiva com o conteúdo de argila (GATIBONI et al., 2015, 2020; VOLF; ROSOLEM, 2020) e grau de intemperismo do solo (ERNANI, 2016; OLIVEIRA et al., 2018). Já o índice P remanescente (P-rem) se baseia na quantidade de P que fica disponível na solução após a adição de uma quantidade conhecida de solução fosfatada ao solo. Quanto maior o valor de P-rem menor será a capacidade do solo em adsorver P. Dentre as vantagens deste método está a maior correlação entre o P e o teor de argila e composição mineralógica, além da rapidez e facilidade de execução (ROGERI et al., 2016).

Para elevar a disponibilidade de P a um valor determinado, como é objetivado em muitos sistemas de adubação, pode ser utilizada a capacidade tampão de P (CTP), pela qual é determinada a quantidade de P necessária para elevar o teor do nutriente no solo em 1 mg dm^{-3} (ROGERI, 2013). Para a determinação do valor de CTP doses de P são adicionados ao solo e após um período de incubação são determinados os valores disponíveis de P por um método de extração específico. Em geral, solos mais argilosos apresentam maior capacidade tampão de P (ROGERI et al., 2016). Com o histórico da adubação e, conseqüentemente, enriquecimento do solo com P, há gradual saturação dos sítios de adsorção (OLIVEIRA et al., 2014; BARROW, 2015). Com isso, a CTP dos solos tende a reduzir e maior percentual do P aplicado permanece em formas mais lábeis (CUBILLA et al., 2007; BARROW; DEBNATH, 2018; ZHANG et al., 2018; MUMBACH et al., 2020).

4.3 ESTRATÉGIAS PARA MELHORAR O APROVEITAMENTO DO P

Buscando minimizar a atuação negativa dos fatores acima mencionados, estudam-se estratégias para melhorar a utilização do P. Estas estratégias podem ter diferentes prioridades, existindo técnicas que visam melhor aproveitar o P residual do solo ou aquelas que buscam aumentar a eficiência de aproveitamento do fertilizante que vir a ser aplicado. De modo geral, essas estratégias são complementares e comumente se encontram associadas (HOPKINS; HANSEN, 2019).

Como já destacado, o P possui grande afinidade a partículas de solo e parte do nutriente não permanece disponível às plantas (BOITT et al., 2018; MUMBACH et al., 2020). O

nutriente permanece armazenado no solo e, gradualmente, o conteúdo total torna-se elevado, especialmente em solos que apresentam média/alta capacidade de adsorção, comuns no Brasil. Levantamentos recentes indicam que entre 1967 e 2016 houve um acúmulo de 33,4 Tg de P, valor que pode ser triplicado até 2050 (WITHERS et al., 2018; PAVINATO et al., 2020). Os estudos de Withers et al. (2018) e Pavinato et al. (2020) elencam estratégias que possam reduzir a dependência de fontes minerais e/ou possibilitar o uso pelas plantas, pelo menos em parte, do P armazenado no solo. De acordo com Withers et al. (2018), o uso de fontes secundárias de P é viável, especialmente os dejetos animais e os resíduos da cana-de-açúcar. Em discussão similar, Pavinato et al. (2020) destacam como algumas estratégias para melhorar o aproveitamento do legado de P no solo: correção do pH do solo, rotação de culturas, condução do solo sob sistemas de cultivo conservacionistas, seleção de espécies mais eficientes na absorção de P e utilização/incremento de microrganismos solubilizadores de P. Além disso, estes destacam a manutenção do solo permanentemente sob cultivo, inclusive com a implantação de espécies de cobertura em períodos de entressafra.

Em solos com disponibilidade insuficiente de P, as plantas podem desencadear mecanismos para aumentar a eficiência de aproveitamento das formas do nutriente presentes no solo. De acordo com Raghothama (1999), as plantas podem desenvolver diversas estratégias para aumentar a absorção de P, as quais podem ser de cunho morfológico, fisiológico, bioquímico e molecular. As principais estratégias de cunho morfológico são o aumento da relação raiz:parte aérea, alteração na arquitetura radicular, com destaque para aumento da proliferação de pelos radiculares, formação de raízes proteóides e associação com fungos micorrízicos. As principais estratégias de caráter fisiológico, bioquímico e molecular são a mobilização de P do vacúolo para o citoplasma, secreção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, maior retenção de P inorgânico nas raízes, secreção e/ou ativação de enzimas como RNases e fosfatases e aumento da produção de transportadores de alta afinidade por P, com alteração na cinética de absorção. Dentro deste contexto, estudos e ferramentais buscam hoje alavancar estratégias para melhorar a utilização do P. Yao et al. (2020) avaliando “ativadores de solo”, como ácidos húmicos, observaram aumento nas formas disponíveis de P em comparação com os tratamentos controle, bem como também foram observadas alterações nas formas do nutriente presentes no solo e alterações na comunidade microbiana do solo.

O P armazenado em solos varia em função do local, histórico de aplicação, espécies cultivadas, clima predominante etc. De acordo com levantamentos de Menezes-Blackburn et al. (2018), considerando principalmente dados produzidos na América do Norte e Europa, os estoques do nutriente no solo poderiam satisfazer os cultivos agrícolas entre 117-352 anos.

Contudo, estes autores, assim como a literatura em geral, destacam a ausência e/ou ineficiência de mecanismos que permitam o aproveitamento deste P. Menezes-Blackburn et al. (2018) citam como algumas estratégias que poderiam contribuir com o aproveitamento do nutriente que está armazenado no solo: i) redução das taxas aplicadas, permitindo que processos biológicos, como a atuação de microrganismos solubilizadores de P, possam liberar P adsorvido (o que, em muitos casos, é inviável, pois sacrificaria o rendimento dos produtores), ii) inoculação do solo/sementes com microrganismos capazes de mobilizar P contido em formas de baixa labilidade e iii) rotação de culturas, utilizando espécies capazes de remobilizar formas menos disponíveis do nutriente.

A associação das raízes das plantas a fungos micorrízicos pode contribuir com a aquisição de P. A rede de hifas criada pelos fungos aumenta o volume de solo explorado e, conseqüentemente, otimiza a absorção de nutrientes (BERRUTI et al., 2014). Thioub et al. (2019) associaram a inoculação de soja com fungos micorrízicos e doses de P na forma de SFT. A inoculação permitiu benefícios em relação ao tratamento controle e, os melhores resultados, foram obtidos quando a prática foi associada à aplicação de dose intermediária de P (15 kg de P ha⁻¹). Esta associação permitiu a liberação de P orgânico pelos microrganismos, aumentou a absorção e a eficiência de uso do P pelas plantas e garantiu, conseqüentemente, maiores rendimentos de grãos.

As principais estratégias adotadas para melhorar o aproveitamento do P a ser aplicado são: i) delimitação das doses, para cada tipo de solo e cultivo, com base em critérios técnicos oficiais, ii) escolha do modo de aplicação, iii) época de adubação e iv) uso de tecnologias associadas aos fertilizantes visando maior eficiência. Os dois primeiros itens, objetos de estudo do presente trabalho, serão mais bem discutidos nos tópicos subsequentes. Há fertilizantes e aditivos para fertilizantes que buscam reduzir a quantidade do nutriente que fica aderido às partículas de solo e indisponível às plantas. Weeks et al. (2019) sistematizaram, em um trabalho de revisão bibliográfica, algumas das principais ferramentas utilizadas para melhorar a eficiência da adubação fosfatada. Dentre as estratégias, podem ser destacadas: i) liberação lenta/controlada (como o uso de polímeros para revestimento dos grânulos), ii) partículas com alta área superficial específica (capazes de adsorver P e liberá-lo posteriormente), iii) matrizes orgânicas com capacidade de retenção de P; iv) minerais contendo P e que apresentam liberação lenta, v) substâncias orgânicas com capacidade de competir com o P por sítios de adsorção (substâncias húmicas e ácidos orgânicos de baixo peso molecular), vi) fontes alternativas como fosfitos e polifosfitos (com atuação na defesa das plantas contra doenças), dentre outros. Volf e Rosolem (2020) avaliaram as taxas de difusão de P em diferentes tecnologias de revestimento

dos grânulos dos fertilizantes superfosfato simples e superfosfato triplo, em solos com contraste textural e histórico da adubação fosfatada; os resultados obtidos não foram satisfatórios em indicar a eficiência dos diferentes mecanismos testados e, segundo os autores, a disponibilidade de P e sua difusão é muito dependente da capacidade sortiva e da disponibilidade do nutriente nos diferentes solos.

A construção de um solo fértil e com capacidade de manter elevados e estáveis produtividades deve contemplar a melhoria das características físicas, biológicas e químicas do solo, bem como garantir condições que limitam as perdas de nutrientes. Neste contexto, contextualizando sobre estratégias de adubação em sistemas de cultivos com fertilidade construída, Resende et al. (2019) destacam algumas estratégias, que podem garantir a redução das perdas e o melhor aproveitamento de nutrientes, como: i) relevo pouco ondulado, ii) textura argilosa, iii) porosidade que permita infiltração e armazenamento de água, iv) altos valores de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica e, v) perfil de solo com baixa acidez e elevada concentração de nutrientes. Para elementos químicos como o P, com estreita afinidade aos constituintes sólidos do solo, reduzida mobilidade e aquisição por parte da planta predominantemente por difusão, praticamente todas estas estratégias apresentam relevância.

4.4 MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA COM ÊNFASE AOS ESTADOS DO RS E SC

A elevação da disponibilidade de P a níveis considerados adequados é fundamental para a obtenção de bons rendimentos agrícolas. A adubação fosfatada deve seguir, assim como ocorre para os demais nutrientes, recomendações técnicas vigentes na região de interesse. Estas recomendações devem ser baseadas em estudos de calibração, considerando as espécies de interesse e métodos de determinação dos nutrientes disponíveis às plantas condizentes (MENEZES-BLACKBURN et al., 2018).

Para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina a adubação e a calagem são recomendadas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS), através do manual de calagem e adubação (CQFS, RS/SC, 2016). De acordo com o manual, o nível de disponibilidade de P pode ser classificado em cinco faixas: “muito baixo”, “baixo”, “médio”, “alto” e “muito alto”, os quais correspondem a rendimentos relativos das culturas de até 40%, 40-75%, 75-90%, 90-100% e teores excessivos, sem aumento de rendimento, respectivamente. As culturas de interesse agrícola apresentam seu máximo retorno econômico quando os teores de P encontram-se no nível crítico (ou nível de suficiência), situação em que os teores do nutriente se encontram

na transição entre “médio” e “alto”. A partir desta condição, o teor do nutriente no solo é considerado adequado e o potencial de rendimento da cultura encontra-se próximo a 90%, no qual a chance de incremento em produtividade com o aumento da adubação é reduzida (CQFS, RS/SC, 2016). A classificação do teor de P de determinado solo em uma das cinco faixas deve considerar também o conteúdo de argila. A CQFS – RS/SC considera quatro classes de argila: classe 1, representada por solos com mais de 60% de argila, classe 2, com solos que apresentam conteúdo de argila entre 41-60%, classe 3, para solos com 21-40% de argila e classe 4, representada pelos solos com até 20% de argila. Os valores dos níveis críticos de P para as culturas de grãos são 9,0, 12,0, 18,0 e 30,0 mg dm⁻³ considerando as classes de argila 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Em solos com a fertilidade construída, em que os teores de P se encontram acima do nível crítico, recomenda-se realizar a adubação de manutenção, quando os teores estiverem na classe “alto”, ou a adubação de reposição, quando a disponibilidade estiver em “muito alto”, repondo ao solo apenas as quantidades exportadas pelos grãos. Uma vez alcançada condição de fertilidade química adequada do solo, a principal preocupação deve ser o monitoramento e a restituição das quantidades de nutrientes que estão sendo exportadas da lavoura, objetivando manter a condição de fertilidade estabelecida (RESENDE et al., 2019).

Por outro lado, quando o solo se encontra com disponibilidade de P abaixo do nível de suficiência, recomenda-se a adubação fosfatada de correção, objetivando elevar os teores de P para a faixa “alto” (CQFS, RS/SC, 2016). Nesta condição, as quantidades de fertilizantes fosfatados adicionados são superiores à demanda das culturas, objetivando suprir o forte dreno exercido pelo solo.

A adubação de correção pode ser feita de maneira gradual, realizada conjuntamente à semeadura e parcelada normalmente em dois cultivos sucessivos, ou ainda de modo total, em que todo o fertilizante é aplicado em dose única, normalmente antecedendo um cultivo e sendo sucedido pelo revolvimento e incorporação, processo esse por vezes denominado fosfatagem. A fosfatagem é uma prática negligenciada atualmente na região Sul, muito em função do alto investimento necessário na maioria das situações (SANTOS et al., 2008a).

As quantidades de P recomendadas para adubação corretiva são 160, 80 e 40 kg de P₂O₅ ha⁻¹ para solos enquadrados nas classes de disponibilidade “muito baixo”, “baixo” e “médio”, respectivamente. Na adubação de correção total estas doses devem ser aplicadas em um único momento, com posterior incorporação na camada arável. Esses valores consideram o potencial de adsorção do P no solo, ou seja, são baseados na quantidade de P necessária para elevar os teores ao nível crítico, não considerando a demanda das plantas cultivadas. Desta forma, aos

valores de adubação corretiva deve-se somar os valores referentes à demanda da cultura de interesse e o rendimento esperado (CQFS – RS/SC, 2016).

Os três valores acima destacados (160, 80 e 40 kg de P_2O_5 ha⁻¹) consideram uma variação na capacidade tampão do solo de acordo com a sua disponibilidade inicial, ou seja, a quantidade de fertilizante fosfatado a ser aplicado para elevar 1 mg dm⁻³ de P_2O_5 disponível no solo (CTP) é maior quando o solo está na classe de disponibilidade “muito baixo” em comparação com situações nas quais o mesmo solo se encontra nas classes “baixo” e “médio” (CQFS – RS/SC, 2016). Considerando as quatro classes de argila propostas pela CQFS – RS/SC e o grupo de culturas de grãos, partindo do limite inferior de cada classe de disponibilidade até atingir o nível crítico de P no solo, deveriam ser aplicados 17,7, 13,3 e 13,3 kg ha⁻¹ de P_2O_5 (classe 1), 13,3, 10,0 e 10,0 kg ha⁻¹ de P_2O_5 (classe 2), 8,9, 6,7 e 6,7 kg ha⁻¹ de P_2O_5 (classe 3) e 5,3, 4,0 e 4,0 kg ha⁻¹ de P_2O_5 (classe 4) para elevar 1 mg dm⁻³ de P nas classes de disponibilidade “muito baixo”, “baixo” e “médio”, respectivamente.

Como potenciais vantagens da adubação corretiva total podem ser destacadas o aumento de P em profundidade e o maior rendimento das culturas (SINGH et al., 2005; OLIVEIRA JUNIOR; CASTRO, 2013; KANG et al., 2014; SOUSA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2020b), com maior estabilidade ou até aumento na produtividade de grãos (HANSEL et al., 2017a; ZANCANARO et al., 2018). De acordo com dados publicados por Oliveira Junior e Castro (2013), independentemente da quantidade de P disponível na camada de 0-10 cm, apenas foram obtidos rendimentos de soja acima de 4000 kg ha⁻¹ quando os teores de P na camada de 10-20 cm foram próximos ou superiores a 10 mg dm⁻³, indicando a possibilidade de elevação do teto de produtividade de culturas agrícolas anuais com a correção de P em subsuperfície. A presença de P em camadas mais profundas do solo deve apresentar resultados mais pronunciados em safras marcadas por déficit hídrico, situações estas que levam à expansão das raízes em profundidade. Neste cenário, a indisponibilidade de P, associada à redução ainda maior da taxa de difusão do P em condição de baixa umidade do solo, pode prejudicar a aquisição do nutriente pelas plantas (ARAÚJO; MACHADO, 2006; NOVAIS; MELLO, 2007; SANTOS et al., 2008a; ZANCANARO et al., 2018).

A correção total da disponibilidade de P pode trazer ganhos de produtividade principalmente quando elevadas doses de fertilizantes são aplicados, como destacado por Sousa et al. (2016). De acordo com os autores, a fosfatagem com doses acima de 100 kg ha⁻¹ de P_2O_5 é efetiva por promover bom desenvolvimento de raízes e adequado acesso ao fertilizante aplicado, enquanto a adubação na linha de semeadura restringe o crescimento das raízes na zona fertilizada. Por outro lado, caso as doses aplicadas forem reduzidas, a correção gradual,

realizada na linha de semeadura, poderá ser mais vantajosa por restringir o contato das partículas de solo com a pequena dose de P.

Um dos grandes entraves à adoção da correção total é a quantidade de P exigida para alcançar valores no solo pré-estabelecidos (ROGERI et al., 2016). Como o fertilizante é incorporado no solo, grandes quantidades de solo, e conseqüentemente inúmeros de sítios de adsorção, entram em contato com grânulos de adubo, o que pode favorecer a indisponibilização, especialmente em solos altamente tamponados. Ainda, o revolvimento do solo expõe sítios de adsorção até então protegidos pelos agregados (GATIBONI et al., 2019). Lu et al. (2018) avaliaram parâmetros biométricos de trigo em resposta à aplicação e mistura de P em diferentes porções de solo; em geral, os melhores resultados da planta foram obtidos quando os fertilizantes foram misturados a porções entre 10-20% do solo. Neste mesmo estudo, extremos de localização e homogeneização (mistura com 0 e 100% do solo), foram prejudiciais ao desenvolvimento da planta.

Nos estados do RS e SC a correção da disponibilidade de P é realizada normalmente de maneira gradual, com a aplicação, em dois cultivos, da quantidade de fertilizante indicada juntamente à semeadura (CQFS, RS/SC, 2016). De acordo com as recomendações vigentes, o produtor deve aplicar 2/3 da dose corretiva no primeiro e 1/3 no segundo cultivo, acrescentando a estes a quantidade de nutriente exigida para satisfazer a expectativa de rendimento da cultura de interesse. Contudo, essa forma de correção da fertilidade do solo contribui para a formação de um gradiente de concentração de P nas camadas superficiais de solo, especialmente até a camada de 0-10 cm (NUNES et al., 2011; OLIVEIRA JUNIOR; CASTRO, 2013; NUNES et al., 2020). Diante disso, com o passar do tempo, tem-se a formação de uma camada superficial com fertilidade adequada e uma camada subsuperficial com disponibilidade abaixo dos níveis de suficiência (SANTOS et al., 2008a).

Destaca-se ainda que a quantidade de P a ser adicionada ao solo varia de acordo com a cultura de interesse. A partir da última edição do manual de calagem e adubação para os estados do RS e SC (CQFS – RS/SC, 2016), as culturas agrícolas são separadas em grupos de exigência, ou seja, agrupando culturas pouco exigentes, exigentes e muito exigentes em P. As culturas exigentes são representadas principalmente pelas espécies anuais de grãos, para o qual há maior quantidade de estudos de calibração. Para as culturas pouco e muito exigentes em P os valores dos níveis críticos foram estabelecidos em 50% e 170% do nível crítico definido às culturas exigentes. De modo exemplificativo, compõem o grupo de baixa exigência em P espécies perenes e de ciclo longo, como frutíferas e florestais, enquanto o grupo de alta exigência é representado por espécies de rápido crescimento, como as olerícolas. Considerando essa

variação no nível crítico de um mesmo solo de acordo com o tipo de cultura a ser implantada e a possibilidade de necessidade de realização da adubação de correção de P, as doses de P recomendadas (160, 80 e 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅) devem ser ajustadas, de acordo com as proporções utilizadas para os ajustes dos níveis críticos.

A recomendação de adubação em outros estados e regiões brasileiras seguem princípios similares aos adotados no RS e SC. A classificação dos teores disponíveis de P também é feita através do agrupamento dos solos de acordo com o conteúdo de argila, considerando a utilização do extrator Mehlich 1 (M-1), no PR e no Cerrado, por exemplo. Em São Paulo, onde a extração é realizada através do método da Resina Trocadora de Ânions (RTA), não é feito o agrupamento dos solos de acordo com o conteúdo de argila, sendo apenas realizada a separação dos solos em classes de disponibilidade de P (RAIJ et al., 1997). No PR a adubação de correção, total ou gradual, é recomendada para nutrientes que se ligam especificamente ao solo, como o P, para solos com disponibilidade muito baixa ou baixa (NEPAR, 2017). A adubação de correção de P no Cerrado também pode ser total ou gradual. A adubação de correção total é similar à realizada em outros estados e a quantidade a ser utilizada se baseia na classe de disponibilidade do P, desde “muito baixo” a “médio”, e o percentual de argila do solo. Adicionalmente, a determinação da dose corretiva, em kg ha⁻¹ de P₂O₅, pode ser feita utilizando fórmulas, onde o valor de argila do solo é multiplicado por 4, 2 e 1 para solos agrupados nas classes “muito baixo”, “baixo” e “médio”, respectivamente. Outra possibilidade para determinação da dose de correção de P foi destacada recentemente por Sousa et al. (2016) e leva em consideração a capacidade tampão de P (CTP), ou seja, a quantidade de P₂O₅ necessária para aumentar 1 mg dm⁻³ o teor de P no solo; com base no valor de CTP, a dose corretiva de P é obtida pela multiplicação do valor de CTP com o valor resultante da diferença entre o teor desejado de P e o teor inicial/natural de P do solo. Já a adubação gradual é baseada no parcelamento da dose de correção em até cinco anos, adicionando-se em conjunto à dose de manutenção, sendo essa prática recomendada para agricultores com menor poder de investimento e/ou solos que demandam uma quantidade muito elevada de fertilizante. Também no Cerrado, para solos sem histórico de adubação e/ou com elevada chance de resposta a adubação fosfatada, a disponibilidade de P pode ser interpretada pelo índice P-rem (SOUSA; LOBATO, 2002).

A consideração das recomendações acima citadas, por si só, não garante uma resposta efetiva da adubação fosfatada. Outros fatores estão associados a esse manejo e devem ser considerados. Sousa et al. (2016), enfatizando solos do Cerrado brasileiro, destacam que os principais fatores a serem considerados são: correção da acidez, tanto em superfície como em

subsuperfície; fontes de fertilizantes, considerando características como solubilidade, granulometria e formas de aplicação; adoção de sistemas agrícolas que potencializem o bom uso do P, como o sistema de plantio direto (SPD), preconizando uma adequada rotação de cultura; e modos de aplicação, com destaque para adubação a lanço e na linha de semeadura. Vem ganhando destaque também a necessidade de melhorias na fertilidade biológica do solo, considerando parâmetros que possam interferir na capacidade das plantas em acessar os nutrientes presentes no solo (MENDES et al., 2018).

4.5 MODOS DE APLICAÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

O SPD preconiza o uso de diversas práticas de manejo visando o uso sustentável e conservacionista do solo, destacando-se o não revolvimento do solo, manutenção da superfície do solo permanentemente coberta com resíduos vegetais, rotação de culturas e adoção do sistema colher-semear, buscando deixar o solo permanentemente sob cultivo. O SPD foi adotado no Brasil na década de 1970 com o objetivo de minimizar os impactos negativos causados pelo intenso revolvimento do solo, em especial as perdas por erosão (FREITAS, 2005; NUNES et al., 2019). Diversos benefícios podem ser obtidos pela adoção do SPD, tanto nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, com destaque para a redução das perdas de nutrientes, redução do efeito tóxico de alguns elementos, aumento do conteúdo de matéria orgânica e aumento da quantidade de água armazenada (CIOTTA et al., 2002).

Em solos conduzidos sob SPD, o não revolvimento do solo contribui para a formação de gradientes de concentração de nutrientes no perfil do solo (NUNES et al., 2011; NUNES et al., 2020). O maior conteúdo de MOS normalmente ocorre nos primeiros centímetros da superfície do solo devido à manutenção e não incorporação dos resíduos vegetais, condição esta que pode resultar na redução dos teores trocáveis de Al pela complexação deste metal com ácidos orgânicos. Pelo mesmo motivo, nutrientes essenciais como P, potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) se acumulam na camada mais superficial do solo (ALMEIDA et al., 2005; NUNES et al., 2019). As correções químicas do solo, como reaplicação de calcário e de fertilizantes, normalmente realizadas ou na superfície do solo ou na linha de semeadura, também contribuem para a formação de um gradiente químico na camada superficial do solo, especialmente até os 10 cm de profundidade (CIOTTA et al., 2002).

Sob SPD consolidado, recomenda-se a adubação fosfatada na linha de semeadura, especialmente em solos com disponibilidade de P abaixo do nível crítico (MODEL;

ANGHINONI, 1992; POTTKER, 1999; SOUSA; REIN, 2011; ZANCANARO et al., 2018), sendo prática indispensável para o bom rendimento das culturas (BARBOSA et al., 2015). A adubação fosfatada na linha de semeadura reduz a distância do nutriente e o sistema radicular das plantas e reduz o contato do fertilizante com um grande volume do solo, retardando assim sua adsorção ao solo (KEPLER; ANGHINONI, 1995; PRADO et al., 2001; SANTOS et al., 2008b) e otimizando o processo de absorção pelas plantas (LU et al., 2018; HOPKINS; HANSEN, 2019; LU et al., 2019; ROSA et al., 2020). A aplicação localizada de P aumenta o grau de saturação dos sítios de adsorção na região fertilizada do solo e, conseqüentemente, reduz a energia de ligação do P ao solo, aumentando assim a eficiência da adubação fosfatada em SPD (ERNANI, 2016; YUAN et al., 2020). A localização do P próximo às sementes/plântulas favorece o processo de absorção do nutriente nos estágios iniciais de desenvolvimento das plantas (LU et al., 2019; ROSA et al., 2020).

O não revolvimento do solo, quando acompanhado das outras práticas que preconizam o SPD, melhora a estrutura do solo e a estabilidade de agregados, reduzindo o número de sítios de adsorção de P expostos (CIOTTA et al., 2002; ALAM et al., 2018; GATIBONI et al., 2019). Apesar da reduzida mobilidade do P no perfil do solo e tendência de acúmulo nos 10 cm superficiais do solo, sob condições de manutenção do solo sem revolvimento e bem estruturado pode haver, ao longo do tempo, a descida de parte do P para camadas mais subsuperficiais, em particular as formas orgânicas do nutriente (EGHBALL et al., 1996). Além disso, a aplicação de P na linha de semeadura garante que o nutriente se concentre em camadas de solo mais subsuperficiais em relação à adubação na superfície do solo (FERNÁNDEZ; WHITE, 2012; BARBOSA et al., 2015).

Atualmente, vem se tornando comum a adubação a lanço, onde os fertilizantes são distribuídos uniformemente na superfície do solo, sem incorporação. Tem por principal objetivo maior agilidade e eficiência das práticas de manejo agrícola, como semeadura e adubação (CERETTA et al., 2007; FRANCISCO; CÂMARA, 2013). Essa prática, associada ao não revolvimento do solo e conseqüente acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo, resulta no aumento substancial da disponibilidade de P nas camadas mais superficiais do solo (ERNANI et al., 2001; COSTA et al., 2010; OLIVEIRA JUNIOR; CASTRO, 2013; ROSOLEM; MERLIN, 2014; NUNES et al., 2020). O gradiente formado no perfil ocorre normalmente, e de maneira mais representativa, na camada de 0-2,5 cm (SOUSA; REIN, 2011; BARBOSA et al., 2015; HANSEL et al., 2017b; NUNES et al., 2020).

Os resultados de campo apresentam respostas variadas em função do modo de aplicação dos fertilizantes fosfatados. A adubação localizada tende a apresentar melhores resultados em

solos com disponibilidade insuficiente de P (PAVINATO; CERETTA, 2004; ALAM et al., 2018; ZANCANARO et al., 2018). Em solos nos quais a disponibilidade encontra-se acima no nível de suficiência, alguns estudos indicam a possibilidade de não haver variação na produtividade das culturas quanto ao modo de aplicação (RESENDE et al., 2016; SOUSA; REIN, 2011; SOUSA et al., 2016; YUAN et al., 2020). Essa não resposta pode ser proveniente da presença de quantidade disponível suficiente à planta, sem grandes chances de resposta à adubação (POTTKER, 1999; PAVINATO; CERETTA, 2004; ZANCANARO et al., 2018). Contudo, melhores respostas da adubação localizada também são observadas em solos com disponibilidade adequada de P (OLIVEIRA JUNIOR; CASTRO, 2013), principalmente em safras marcadas por períodos de estiagens (ZANCANARO et al., 2018). Respostas similares de rendimento de grãos, independentemente do modo de aplicação dos fertilizantes, também são observados (COSTA et al., 2010; ROSOLEM; MERLIN, 2014), assim como há estudos que observam maiores rendimentos com a adubação a lanço (OLIVEIRA et al., 2020b). Especialmente em safras com boa disponibilidade hídrica, a concentração das raízes em superfície, juntamente com o maior conteúdo de P lábil, podem beneficiar as plantas (ROSA et al., 2020).

Sumarizando diversos estudos que avaliaram formas de aplicação de P, Nkebiwe et al. (2016) observaram ganhos médios de 3,7% quando a adubação fosfatada foi realizada de modo localizado; esses ganhos aumentaram para 15-27% quando fontes de N foram adicionadas juntamente ao P, localizadamente. Alam et al. (2018), avaliando a disponibilidade de P no solo e o rendimento de milho sob diferentes modos de adubação, observaram que a aplicação localizada, na superfície do solo, pode ser uma alternativa interessante, com melhores resultados que a adubação superficial a lanço e a adubação em maiores profundidades. Segundo os autores, este resultado é proveniente da associação de fatores que ocorreram na camada até 6 cm, como maior densidade de raízes, maior disponibilidade de água, aumento da absorção de P, aumento do conteúdo de MOS e N no solo. Por outro lado, Sá et al. (2013) observaram, em solo com adequada disponibilidade inicial de P e adequada condição hídrica, aumento médio de 16% no rendimento de milho com a adubação a lanço e superficial de P em comparação à adubação localizada. Autores atribuíram este resultado à absorção mais homogênea de P pelas raízes no solo com adubação a lanço, enquanto na adubação localizada apenas parte das raízes teve acesso à boa disponibilidade de P. De acordo com Sousa et al. (2016) a adubação a lanço, implementada após o solo atingir o nível adequado de P, pode ser considerada uma prática viável a longo prazo. Segundo os autores, ao longo dos cultivos, tanto a prática da semeadura,

revolvendo parcialmente o solo, como a capacidade das raízes das plantas em mobilizar P, contribuem com a translocação vertical de parte do P aplicado superficialmente.

A espécie vegetal cultivada e o relevo do solo também podem influenciar a resposta dos modos de aplicação dos fertilizantes fosfatados. Com a aplicação superficial e sem incorporação dos grânulos de adubo, as espécies da família das gramíneas, como trigo e milho, apresentam mais facilidade em absorver o P, uma vez que o sistema radicular é fasciculado, com a presença de maior quantidade de raízes nas camadas superficiais, enquanto as leguminosas, como a soja, terão mais dificuldade em acessar o nutriente disponível superficialmente (CERETTA et al., 2007). Lavouras com maior declividade do terreno, comuns na região Sul do Brasil, apresentam menor aptidão à adubação a lanço, uma vez que o risco de perdas do nutriente por escoamento superficial é maximizado, resultando em prejuízos econômicos e ambientais (PAVINATO; CERETTA, 2004; FISCHER et al., 2018; DALL'ORSOLETTA et al., 2021).

A adubação de sistemas é uma alternativa de manejo da adubação, indicada principalmente para solos com fertilidade construída, ou seja, nos quais a disponibilidade de nutrientes no solo está acima do nível crítico. Esta prática consiste em uma única aplicação dos nutrientes buscando satisfazer a absorção das plantas no decorrer de um ano agrícola, para duas ou três espécies, e permite maior agilidade às operações agrícolas. A adubação de sistema apresenta melhores resultados em solos bem implantados e bem conduzidos sob SPD (RESENDE et al., 2016). Outra possibilidade, especialmente buscando a redução de custos, é a alternância dos modos de aplicação: em determinados cultivos a adubação fosfatada é realizada a lanço, garantindo maior eficiência operacional, enquanto em outros é realizada na linha de semeadura, permitindo a colocação de P de modo localizado e em maior profundidade do solo (PROCHNOW et al., 2017).

4.6 INFLUÊNCIA DA DISPONIBILIDADE DE P NO CRESCIMENTO RADICULAR DAS PLANTAS

O P apresenta reduzida mobilidade no solo, dificultando a absorção pelas plantas (ARAÚJO; MACHADO, 2006; LU et al., 2019). Diante disso, boa parte do P absorvido pelas plantas provém do processo de difusão, que ocorre pela diferença de concentração do nutriente entre as raízes e o solo (NOVAIS; MELLO, 2007). Uma adequada absorção de P pelo processo de difusão depende da quantidade de P presente no solo, da umidade do solo e da arquitetura radicular das plantas (ARAÚJO; MACHADO, 2006; PÉRET et al., 2014). O aumento da densidade de raízes aumenta o volume de solo explorado e, conseqüentemente, aumenta a eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados (GONZALES-ERICO et al., 1979).

A quantidade de P adicionado ao solo bem como a forma de aplicação influenciam o crescimento e arquitetura radicular das plantas (HAVLIN et al., 2013; FAN et al., 2016; HANSEL et al., 2017b; LU et al., 2018). A expansão radicular em profundidade pode ser fundamental para a boa absorção de P e outros nutrientes, bem como para o bom rendimento das plantas (NKEBIWE et al., 2016). A maioria das culturas agrícolas, especialmente as de ciclo curto, tem seu sistema radicular concentrado nos 20 cm superficiais do solo (LI et al., 2017). Os principais fatores que afetam o desenvolvimento das raízes são a densidade e estrutura do solo, aeração, disponibilidade de água e disponibilidade de nutrientes e elementos tóxicos (FAN et al., 2016). De maneira geral, a presença de P tende a estimular o crescimento radicular, ou seja, maior quantidade de raízes é observada em regiões ricas no nutriente (HAVLIN et al., 2013; HANSEL et al., 2017b; NUNES et al., 2019). A ausência de água, contudo, pode ser tão ou mais restritiva ao crescimento de raízes do que o P (SINGH et al., 2005; KANG et al., 2014; JIN et al., 2015).

As plantas possuem capacidade de responder à deficiência de P, modificando sua arquitetura radicular (SHEN et al., 2011). A deficiência de P pode estimular o crescimento de raízes laterais e o aumento da densidade e comprimento de pelos radiculares (BARBER, 1995). Contudo, a disponibilidade adequada de P é favorável ao desenvolvimento radicular, especialmente das raízes primárias (LINKOHR et al., 2002; PÉRET et al., 2014; LI et al., 2017). Além disso, zonas do solo ricas em P tendem a favorecer a presença de raízes nesses locais (LINKOHR et al., 2002; COSTA et al., 2010; SHEN et al., 2011). Assim, a aplicação localizada de P tende a favorecer o maior crescimento de raízes nas regiões do solo ricas no nutriente (BARBER, 1995).

A aplicação superficial de fertilizante fosfatado, normalmente a lanço, resulta em um crescimento superficial das raízes, podendo prejudicar a absorção de P e, conseqüentemente, o bom desenvolvimento das plantas, especialmente sob déficit hídrico (HANSEL et al., 2017b). A adubação na linha de semeadura, além de reduzir a adsorção de P nas regiões adjacentes, contribui com a distribuição de P em maior profundidade (BARBOSA et al., 2015; NUNES et al., 2020) e, conseqüentemente, resulta em maior produtividade das culturas agrícolas (NIKEBIWE et al., 2016) e/ou minimiza perdas em safras com déficit hídrico (HANSEL et al., 2017b). A elevada concentração de P em regiões localizadas de solo, como ocorre principalmente pela adubação na linha de semeadura, leva ao aumento de absorção do nutriente nesta região, fruto de modificações da arquitetura radicular das plantas, com significativo aumento da quantidade e redução do raio das raízes, aumentando o volume de solo explorado por unidade de raiz (SOUSA et al., 2016).

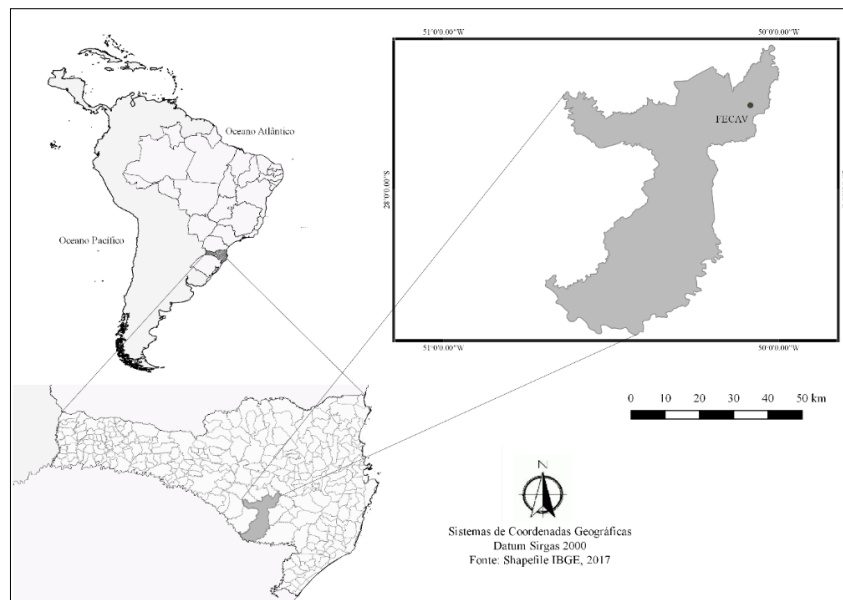
5 EXPERIMENTO 1. CONSTRUÇÃO DE PERFIL DE P EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

5.1 MATERIAL E MÉTODOS

5.1.1 Caracterização do local de implantação do experimento

O experimento foi instalado na fazenda experimental (FECAV) do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UEDESC), em Lages, SC (27°44'54,11" de latitude e 50°05'08,09" de longitude, e 884 metros de altitude) (Figura 1). Segundo a classificação de Köppen (PEEL et al., 2007), o clima do local é classificado como do tipo Cfb (mesotérmico úmido, com verão ameno).

Figura 1 - Mapa de localização da fazenda experimental do CAV/UEDESC (FECAV), em Lages/SC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O solo da área experimental é classificado como Cambissolo Húmico Alítico típico (EMBRAPA 2013). Antes do revolvimento do solo e início da construção do experimento, foi realizada coleta de solo na camada 0-20 cm e foram realizadas análises químicas e físicas para caracterização, obtendo-se os seguintes resultados: 28, 31 e 41% de argila, silte e areia, respectivamente; 4,6 de pH H₂O; 4,9 de Índice SMP; 5,1% de matéria orgânica; 7,9 e 186,8 mg dm⁻³ de P e K, respectivamente; 2,9, 5,6 e 3,2 cmol_c dm⁻³ de Al, Ca e Mg trocável, respectivamente; 15,6, 10,9, 13,9 e 26,5 cmol_c dm⁻³ de H+Al, soma de bases, CTC efetiva e CTC pH 7, respectivamente; e 21,5 e 41,1% de saturação por alumínio e saturação por bases, respectivamente.

Para neutralização da acidez do solo, foi aplicado calcário dolomítico no primeiro semestre de 2016. O corretivo aplicado apresentava 90% de PRNT, com 29% de óxido de Ca e 19% de óxido de Mg, objetivando elevar o pH a 6,0. Todo o calcário foi distribuído uniformemente na área, em uma única aplicação, na superfície do solo e, posteriormente, incorporado na camada de 0-20 cm.

Antes da implantação do experimento e cerca de 8 meses após a calagem, realizou-se nova caracterização química, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, apresentando o solo 5,06 e 3,85 mg dm⁻³ de P extraídos por Mehlich 1 nas duas camadas, respectivamente, valores estes classificados na faixa “muito baixo” pela CQFS – RS/SC (2016). Adicionalmente, foi realizado fracionamento químico de P (HEDLEY et al., 1982), obtendo-se os seguintes resultados: 32,6 e 25,1 mg kg⁻¹ de P lábil, 264,5 e 81,4 mg kg⁻¹ de P moderadamente lábil e 110,1 e 110,2 mg kg⁻¹ de P não lábil, considerando as camadas 0-10 e 10-20 cm, respectivamente.

5.1.2 Construção dos níveis de fertilidade e descrição dos tratamentos

O estudo foi delineado em esquema fatorial, com aplicação de doses de adubação fosfatada nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm, aplicadas concomitantemente ao primeiro cultivo, e modos de aplicação da adubação, ao longo de todos os cultivos. Dentro do esquema fatorial, foram avaliadas três doses de P na camada 0-10 cm: 0, 28,4 e 56,8 kg ha⁻¹ de P (0, 65 e 130 kg ha⁻¹ de P₂O₅), e três doses de P na camada 10-20 cm: 0, 28,4 e 56,8 kg ha⁻¹ de P (0, 65 e 130 kg ha⁻¹ de P₂O₅); os dois modos de aplicação foram: a lanço e na linha de semeadura. Adicionalmente, a dose de 113,5 kg de P (260 kg ha⁻¹ de P₂O₅) foi aplicada em ambas as camadas. As unidades experimentais, com uma área total de 8 m² (4x2 m), foram distribuídas em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições.

Como fonte de P utilizou-se o fertilizante mineral solúvel superfosfato triplo (SFT). As doses de SFT foram aplicadas objetivando elevar os teores de P a 15 mg dm⁻³, 30 mg dm⁻³ e 45 mg dm⁻³, ou seja, às classes de disponibilidade “médio”, “alto” e “muito alto”, de acordo com a CQFS – RS/SC (2016), utilizando para isso valores de uma incubação prévia do solo com doses do mesmo fertilizante. Para a incubação, em amostras de 100 g do solo do experimento foram adicionadas as doses de 0, 30, 60, 120 e 240 kg de P₂O₅ ha⁻¹, na forma de SFT. Após 20 dias de incubação, foram determinadas as quantidades de P extraídas pelo método Mehlich 1 (TEDESCO et al., 1995) e as quantidades de P necessárias para alcançar os valores desejados

no solo foram definidas pela relação linear entre as doses aplicadas e o P disponível analisado após a incubação.

A figura 2 ilustra o processo de construção dos níveis de fertilização fosfatada no solo. Inicialmente toda a camada superficial do solo (0-10 cm) foi retirada, com auxílio de um implemento de nivelamento acoplada a um trator. Posteriormente, após a demarcação das parcelas, foram construídos os níveis de P na camada subsuperficial (10-20 cm). O fertilizante foi aplicado a lanço e posteriormente foi realizado um revolvimento mecânico, objetivando a incorporação deste na camada de interesse.

Na etapa seguinte o solo da camada superficial foi recolocado na área, com auxílio de concha acoplada a trator, e as parcelas foram demarcadas em definitivo. Foram aplicadas na camada 0-10 cm as mesmas dosagens de SFT, também objetivando elevar os teores de P a 15 mg dm^{-3} , 30 mg dm^{-3} e 45 mg dm^{-3} , ou seja, níveis “médio”, “alto” e “muito alto”, respectivamente. Esta aplicação foi realizada juntamente com a semeadura da primeira cultura agrícola. Neste momento também se subdividiu a aplicação de P na camada superficial nos modos a lanço e na linha de semeadura. Importante salientar que para o primeiro cultivo já foram testados os dois modos de aplicação; assim, as doses de correção para a camada 0-10 cm foram aplicadas ou a lanço ou na linha de semeadura.

Figura 2 - Processo de construção do experimento, compreendo as fases de i) retirada da camada superficial, ii) aplicação do fertilizante fosfatado em subsuperfície, iii) recolocação do solo na camada de 0-10 cm e, finalmente, iv) aplicação do fertilizante fosfatado em superfície, na linha de semeadura ou a lanço.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Importante destacar que a partir do segundo cultivo a adubação fosfatada passou a ser realizada apenas na camada superficial do solo (0-10 cm), seguindo recomendações técnicas vigentes na região, para cada espécie cultivada (CQFS-RS/SC, 2016), com dose igual para todos os tratamentos e seguindo as recomendações para adubação de reposição. Os modos de aplicação, a lanço e na linha de semeadura, continuaram variando, de acordo com a condição inicial.

5.1.3 Implantação e condução das espécies cultivadas

Foram cultivados, nesta sequência, milho (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*), soja (*Glycine max*), aveia-preta (*Avena strigosa*), soja, cevada (*Hordeum vulgare*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*), cujas semeaduras foram realizadas em 08/12/2016, 04/07/2017, 06/12/2017, 21/08/2018, 06/11/2018, 27/05/2019 e 18/01/2020, respectivamente.

O processo de implantação foi similar para todas as culturas, com abertura dos sulcos, adubação e semeadura, manualmente. A adubação fosfatada na linha de semeadura foi realizada previamente à deposição das sementes, enquanto a adubação lanço foi realizada após a semeadura. Foi realizada também adubação com K e N, na superfície do solo, para as gramíneas e feijão, e apenas adubação potássica para a soja; as quantidades aplicadas foram baseadas nas expectativas de rendimento de cada cultivo e, para K, com base na adubação de reposição. Para suprir a demanda de N da cultura da soja, foi realizada inoculação das sementes com inoculante turfoso contendo a bactéria *Bradyrhizobium japonicum*, utilizando-se dosagem duas vezes superior à recomendada.

O milho (cultivar Dekalb 240 VT PRO 2) foi semeado em espaçamento entre linhas de 50 cm e entre plantas de 33 cm, com uma população final de 60000 sementes ha⁻¹. Nenhum tratamento fitossanitário foi necessário. A adubação nitrogenada foi realizada em cobertura e em duas épocas: metade no estágio V5 (em torno de 35 dias após a emergência) e a outra metade cerca de 21 dias após a primeira aplicação.

As culturas do trigo (cultivar BRS Marcante), aveia-preta (cultivar Embrapa 139) e cevada (linhagem PFC 2011050) foram semeadas em espaçamento de 20 cm entre linhas, com densidades de 330, 400 e 300 sementes m², respectivamente. A adubação nitrogenada também foi realizada em cobertura, no início do estágio de perfilhamento, que ocorreu, em média, 30 dias após a emergência das plântulas. Foram realizadas três e duas aplicações de fungicidas no trigo e aveia-preta, respectivamente, com intuito de prevenir doenças fúngicas.

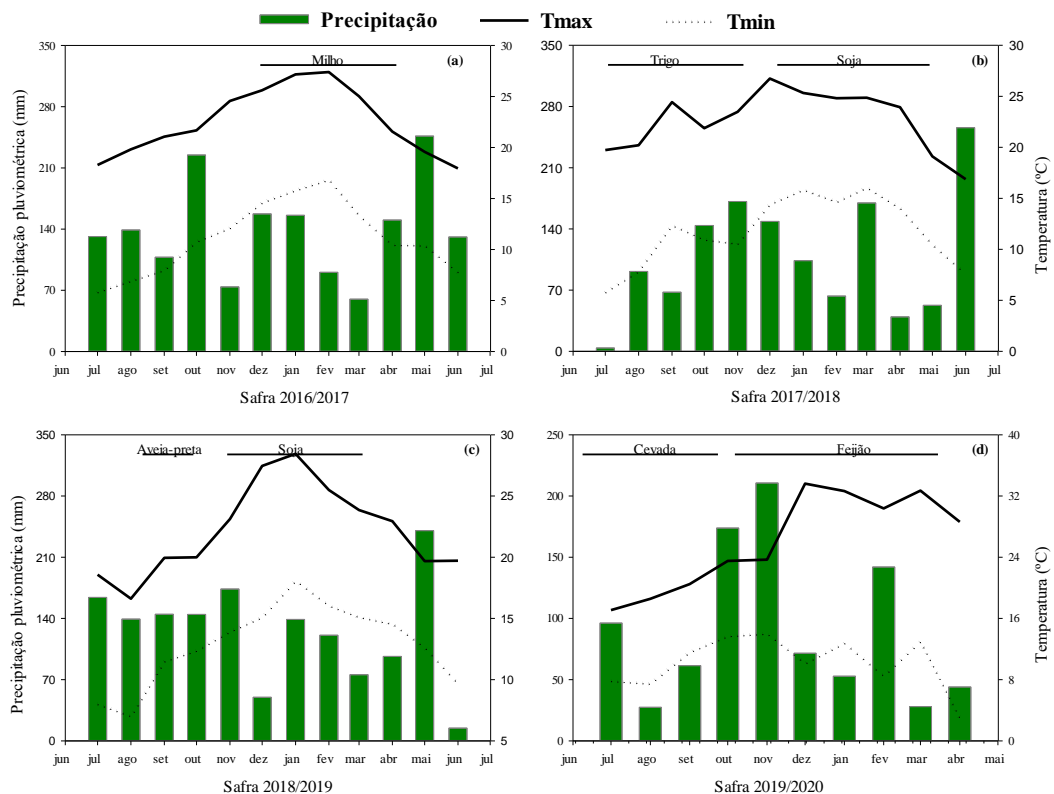
Para as safras de soja foram utilizadas sementes da cultivar Nidera 5909, enquanto para o feijão foram utilizadas sementes da cultivar BRS Estilo. Soja e feijão foram semeados em

espaçamento entre linhas de 50 cm, com populações de 285 mil e 300 mil sementes ha^{-1} para as duas safras de soja, respectivamente, e 350 mil sementes ha^{-1} para o feijão. Foram realizadas 2 aplicações de fungicidas, com intuito de prevenir doenças fúngicas, em cada cultivo de soja. No feijão foi realizada apenas uma aplicação de fungicida, em pré-florescimento.

As quantidades de P, K e N aplicadas foram baseadas na adubação de reposição, com expectativas de rendimento de 8,0, 3,0, 4,0, 3,0, 3,0 e 4,0 Mg ha^{-1} para as culturas do milho, trigo, soja, aveia-preta, cevada e feijão, respectivamente. A adubação fosfatada utilizando esse critério foi realizada apenas a partir do segundo cultivo, já que para a cultura inicial apenas foram aplicadas as doses corretivas. Desta forma, para as culturas do trigo, soja, cevada e feijão foram aplicados 13,1, 24,4 (para cada cultivo), 13,1 e 24,4 kg ha^{-1} de P como reposição, respectivamente. Para a cultura da aveia-preta não foi realizada qualquer adubação.

A figura 3 apresenta os dados meteorológicos coletados no município de Lages durante o período de condução do experimento. Em relação aos índices pluviométricos, foram contabilizados nos cultivos de milho, trigo, sojaI, aveia-preta, sojaII, cevada e feijão 576, 454, 535, 244, 616, 467 e 260 mm, respectivamente.

Figura 3 - Temperaturas médias máxima (Tmax) e mínima (Tmin) e somatório mensal da precipitação (Precipitação), ao longo das safras 2016/2017 (a), 2017/2018 (b), 2018/2019 (c) e 2019/2020 (d), compreendendo o período de condução do experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. Dados climáticos fornecidos pela Epagri/Ciram, SC.

5.1.4 Obtenção de dados

Para avaliar a resposta das culturas aos tratamentos foram determinados: rendimento de grãos (exceto para aveia-preta), peso de mil grãos e concentração de P dos grãos. Para avaliação da produtividade de grãos de milho, trigo, soja, cevada e feijão foram colhidas as plantas de 3,0, 2,4, 3,0, 2,4 e 3,0 m² de cada parcela, respectivamente. Após colhidos, os grãos foram pesados e o rendimento calculado em quilogramas por hectare, com a umidade de grãos corrigida para 13%. O peso de mil grãos foi obtido pela pesagem de 200 grãos por parcela, com o resultado sendo multiplicado por “5”. Uma fração dos grãos colhidos de cada parcela foi moída em moinho do tipo “Willey”, com posterior digestão por via úmida, com ácido sulfúrico + peróxido de oxigênio + mistura de digestão contendo sulfato de cobre, sulfato de sódio e selênio (TEDESCO et al., 1995), analisando-se a concentração de P. O P foi determinado por colorimetria, em comprimento de onda de 882 nm (MURPHY; RILEY, 1962).

Foram realizadas 4 coletas de solo, sempre após a colheita da cultura de verão (após 1º, 3º, 5º e 7º cultivos). As coletas foram realizadas com trado calador, com três pontos de coleta dentro de cada parcela e seguindo a metodologia proposta pela CQFS – RS/SC (2016) para adubações na linha de semeadura. Foram amostradas as camadas 0-10 e 10-20 cm. Após coletadas as amostras foram secadas em estufa a 55 °C de temperatura, moídas e tamisadas em malha de 2 mm. Nas amostras de solo foram determinados o pH H₂O, H+Al, P e K disponível e Ca, Mg e Al trocáveis, e calculados os valores de CTC pH7 e saturação por bases. O pH H₂O foi determinado em relação solo: água 1:1 e o Índice TSM (necessário para calcular H+Al) foi determinado em relação solo:água:solução 1:1:0,5, seguindo metodologias de Tedesco et al., (1995) e Toledo et al. (2012), esta última utilizada para a determinação do índice TSM. Os valores de P e K disponíveis foram extraídos através da solução do duplo ácido – Mehlich 1 (Tedesco et al., 1995); a determinação de P foi realizada por espectrofotometria de absorção molecular, em comprimento de onda de 882 nm (MURPHY; RILEY, 1962), enquanto o K foi determinado por fotometria de chama. Os valores de Ca, Mg e Al trocáveis foram extraídos por solução de KCl 1 mol L⁻¹, conforme metodologia de Tedesco et al. (1995); a determinação de Ca e Mg foi realizada espectrofotometria de absorção atômica, enquanto o Al foi determinado por titulação com solução de NaOH 0,0125 mol L⁻¹. Os valores de CTC pH7 e saturação por bases foram calculados conforme equações presentes no manual de calagem e adubação para os estados do RS e SC (CQFS – RS/SC, 2016).

5.1.5 Cálculos e correlações

Considerando as quantidades de P aplicadas e exportadas através da colheita dos grãos, foram realizados os cálculos de balanço simplificado de P, através da equação: “[*Balanço de P = P aplicado via adubação - P exportado pelos grãos*]”. Com base nestes mesmos valores, foram calculados os percentuais de P exportados, através da equação: “[*Percentual de P exportado = (P exportado / P aplicado) * 100*]”. As quantidades de P exportadas pelos grãos foram obtidas através da razão entre a concentração de P e o rendimento dos grãos.

Para o rendimento de grãos, peso de 1000 grãos, concentração de P nos grãos e quantidades de P exportadas pelos grãos, foram geradas equações de interação entre as todas as doses de P aplicadas nas duas camadas de solo (0-10 e 10-20 cm). As equações foram geradas através da ferramenta "Backward stepwise". Além da consideração da dose adicional (260 kg de P_2O_5 ha^{-1}), foram consideradas as doses de reposição aplicadas a partir do segundo cultivo. As doses de reposição foram acrescidas às doses de correção na camada de 0-10 cm. Cabe também salientar que, para estas avaliações, as quantidades aplicadas foram utilizadas na unidade de kg de P ha^{-1} . Além disso, nos casos em que foi calculada a resposta das doses aplicadas na resposta acumulada (resposta acumulada para rendimento de grãos e P exportado pelos grãos), os valores obtidos foram transformados em valores relativos, efetuando-se posteriormente a média dos 6 cultivos.

Os teores de P considerados disponíveis no solo, obtidos através da extração das amostras de solo coletadas com Mehlich 1, foram relacionados com as quantidades de grãos produzidas. Inicialmente, foram geradas equações múltiplas para avaliar o efeito interativo entre as doses aplicadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm. Posteriormente, foi estimado o nível de P no solo necessário para alcançar 90% do rendimento relativo, em cada um dos cultivos e para o rendimento acumulado. Para isso, foram geradas equações exponenciais não lineares com tendência ao máximo. Os valores de rendimento relativo foram calculados com base nos tratamentos que apresentaram os maiores rendimentos, os quais se atribuiu valor de 100%.

Ainda, foram correlacionadas as quantidades de P aplicadas e os conteúdos de P disponíveis no solo com os rendimentos de grãos obtidos. Estas duas últimas avaliações citadas foram realizadas considerando as quantidades aplicadas e extraídas tanto nas camadas 0-10 e 10-20 cm, como também na camada total, ou seja, de 0-20 cm.

Para as avaliações, neste tópico mencionadas, que consideraram os teores disponíveis de P no solo, as espécies cultivadas foram agrupadas de acordo com a coleta de solo realizada. As culturas do milho e do trigo (safra 2016/2017 e 2017) foram relacionadas aos resultados da primeira coleta de solo, realizada no período de entressafra destes dois cultivos; o primeiro cultivo com soja (safra de 2017/2018) foi relacionado à segunda coleta de solo, realizada logo

após a colheita dos grãos desta cultura; o segundo cultivo com soja (safra de 2018/2019) e o cultivo com cevada (safra 2019) foram comparados com a terceira coleta de solo, realizada no período de entressafra destes dois cultivos; finalmente, os resultados com feijão (safra 2019/2020) foram comparadas com a quarta e última coleta de solo, realizada logo após a colheita desta cultura.

5.1.6 Análise estatística

Os dados coletados foram inicialmente testados quanto a sua normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e ao teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett. Quando necessário, foram normalizados pelo teste de boxcox. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Se significativos, foram comparados pelo teste de Tukey, à probabilidade de erro de 5%. As análises estatísticas foram realizadas através do software R (R Core Team, 2020) e pelo software Sisvar 5.6 (FERREIRA et al., 2014).

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

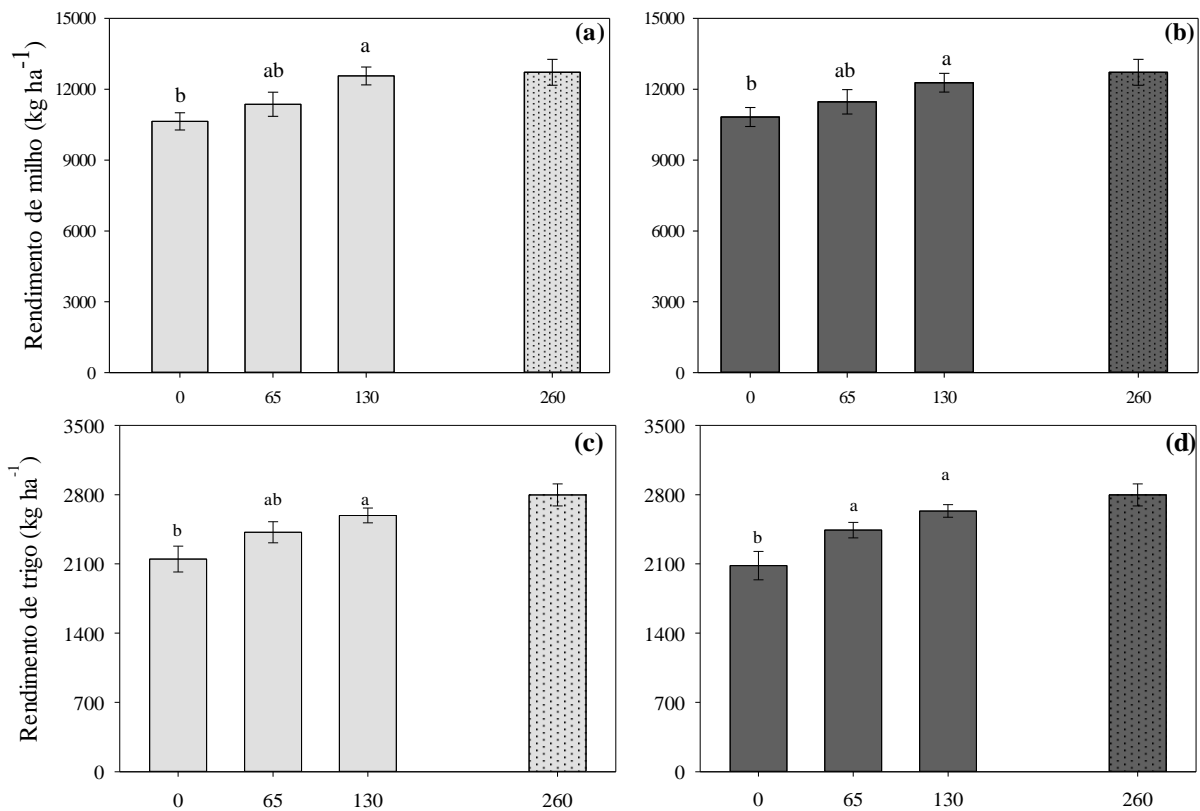
Os resultados de todos os cultivos serão apresentados de forma conjunta, separando-se as variáveis analisadas. Assim serão apresentados a seguir, em sequência: rendimento de grãos, peso de 1000 grãos, concentração e quantidades exportadas de P pelos grãos, balanço e percentuais de P recuperados, atributos químicos do solo nas quatro coletas realizadas, relações entre o conteúdo de P disponível no solo e o rendimento de grãos.

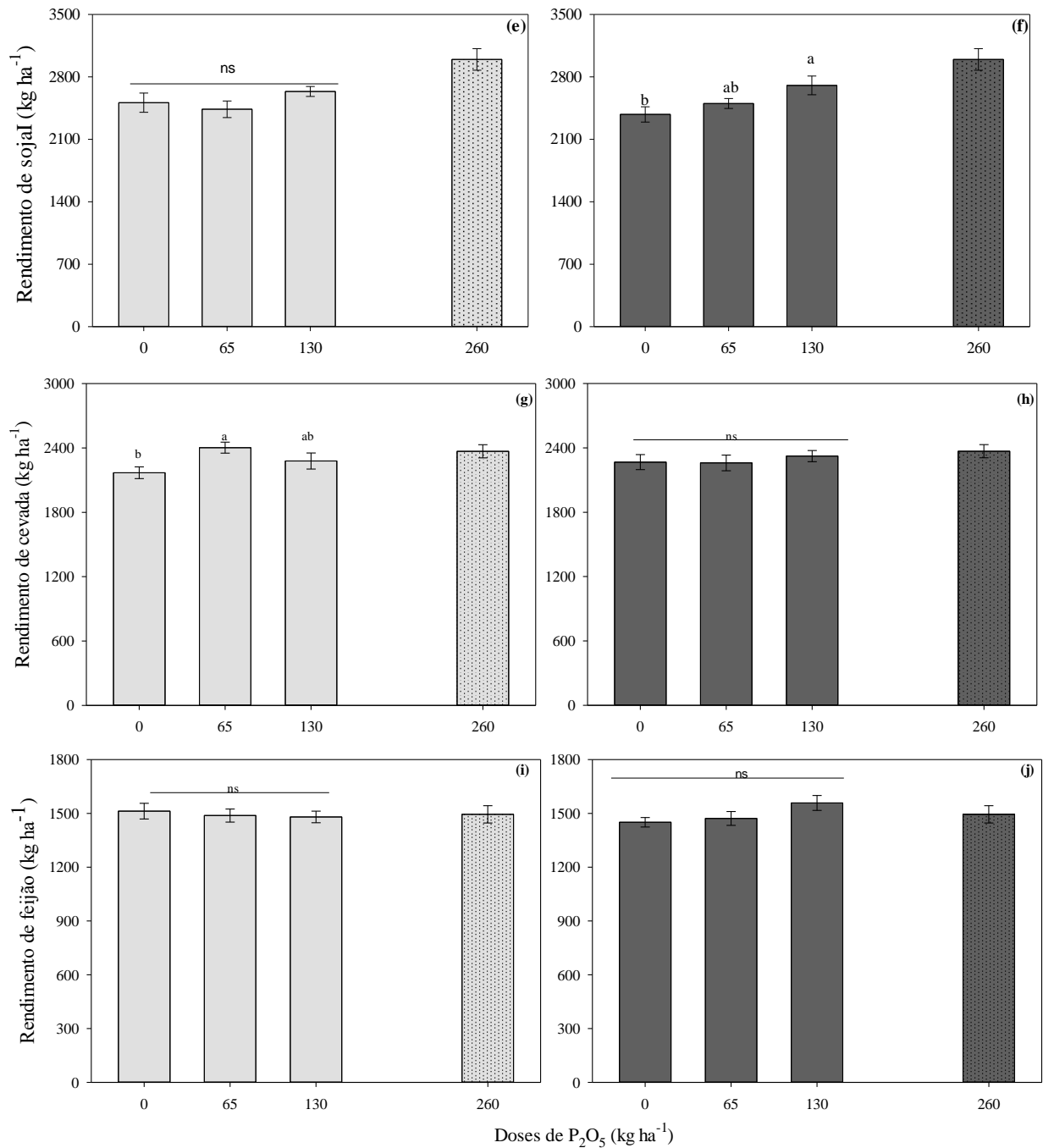
5.2.1 Rendimento de grãos

A adubação fosfatada de correção influenciou o rendimento de grãos dos cultivos realizados entre 2016 e 2020, com exceção para o último cultivo, com feijão (Figura 4). A localização deste fertilizante, na camada 0-10 e/ou 10-20 cm, teve respostas variadas para cada cultivo. No cultivo com milho (safra 2016/2017) (Figuras 4a e 4b), a adição de 130 kg de P_2O_5 ha^{-1} , em comparação à ausência de adubação corretiva, garantiu incrementos de 18,1 e 13,4% quando realizada nas camadas 0-10 e 10-20 cm, respectivamente. Para o trigo (Figura 4c e 4d), a adição de 130 kg de P_2O_5 ha^{-1} na camada 0-10 cm aumentou a produtividade em 20,6% em relação ao controle; a adubação corretiva na camada 10-20 cm resultou em ganhos de produtividade de 17,2 e 26,6% quando adicionados 65 e 130 kg de P_2O_5 ha^{-1} , respectivamente. Na safra 2018/2019, a cultura da soja (sojaI) teve seu rendimento alterado apenas pela adubação

fosfatada corretiva em subsuperfície (Figuras 4e e 4f): a adição de 130 kg de P_2O_5 ha^{-1} na camada 10-20 cm, em relação ao tratamento sem adubação de correção, resultou em incremento de 13,7% na produtividade; a produtividade média na camada 0-10 cm, considerando a aplicação de 0, 65 e 130 kg de P_2O_5 ha^{-1} , foi de 2528,9 kg ha^{-1} . Para a cultura da cevada, adicionando-se 65 kg de P_2O_5 ha^{-1} na camada 0-10 cm houve aumento de 10,8% na produtividade, em comparação à condição sem aplicação (Figuras 4g e 4h); nenhum acréscimo significativo foi observado pela adubação corretiva em subsuperfície, com rendimento médio de 2283,7 kg ha^{-1} . Finalmente, no cultivo do feijão (safra 2019/2020), não houve qualquer resposta à adubação de correção (Figuras 4i e 4j), com a média de rendimento sendo de 1493,8 kg ha^{-1} .

Figura 4 - Rendimentos de grãos em função da adubação fosfatada corretiva realizada nas camadas 0-10 e 10-20 cm, das culturas do milho (a= 0-10, b= 10-20), trigo (c=0-10, d= 10-20), sojaI (e= 0-10, f= 10-20), cevada (g= 0-10, h= 10-20), feijão (i= 0-10, j= 10-20).



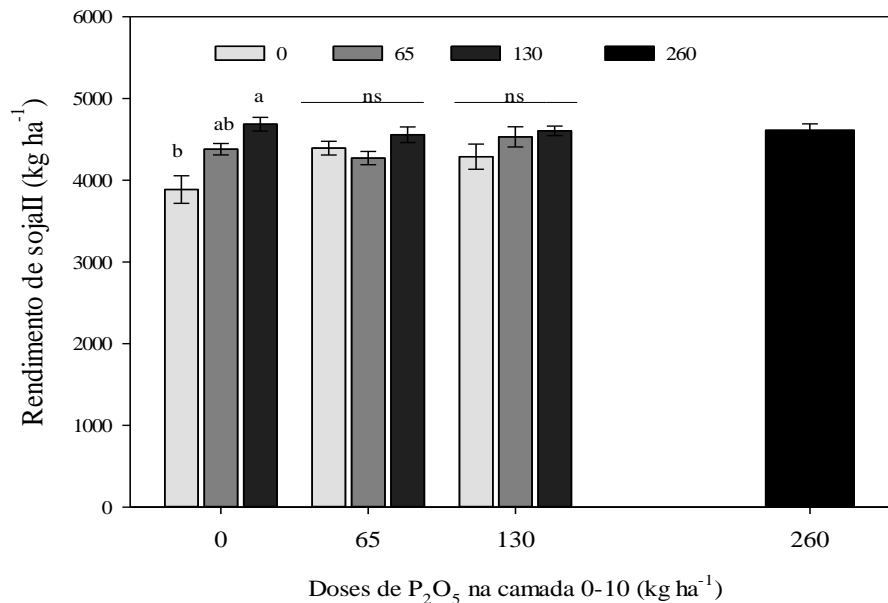


Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. ns: não significativo estatisticamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O rendimento da sojaII (safra 2018/2019) apresentou efeito de interação entre as fertilizações realizadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm (Figura 5). Estatisticamente, considerando a condição de não adubação na camada 0-10 cm, houve aumento de 20,6% na produtividade quando adicionada a dose 130 kg de P₂O₅ ha⁻¹ na camada 10-20 cm, em comparação à condição de não correção em subsuperfície.

Figura 5 - Rendimento de grãos de sojaII em função da interação entre as doses de adubação fosfatada corretiva aplicadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm.



Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. ns: não significativo estatisticamente. Observação: as doses aplicadas na camada 10-20 cm são representadas dentro de cada grupo de barras, para cada dose aplicada na camada 0-10 cm disposta no eixo "x".

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Considerando as quantidades totais de P aplicadas na camada 0-10 cm (correção + reposições) e na camada 10-20 cm (correção), foram geradas as equações de resposta ao rendimento de grãos dos cultivos (Tabela 1). No primeiro cultivo, com milho, maiores acréscimos em termos de rendimento foram observados para a adição de P na camada superficial, enquanto para os demais cultivos as melhores respostas foram observadas para o fornecimento de P na camada 10-20 cm. Para os cultivos com cevada e feijão não foi possível gerar equações estatisticamente significativas. Considerando o rendimento acumulado relativo, a adubação fosfatada em subsuperfície apresentou melhor resposta: cada 1 kg de P ha⁻¹ nas camadas 0-10 e 10-20 cm representou aumentos de 0,20 e 0,25 % na produtividade, respectivamente.

Tabela 1 - Regressões múltiplas em função da interação entre as doses de P aplicadas nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm, com base no rendimento de grãos obtido nos diferentes cultivos.

Cultura	Equação	R ²	p
Milho	$y = 9475,6 + 47,3 (a^{**}) + 39,0 (b^*) - 0,50 (ab^*)$	0,51	<0,01
Trigo	$y = 1570,7 + 12,8 (a^{**}) + 16,9 (b^{**}) - 0,20 (ab^{**})$	0,68	<0,01
SojaI	$y = 2130,3 + 0,05 (a^{2*}) + 12,6 (b^{**}) - 0,10 (ab^{**})$	0,72	<0,01
SojaII	$y = 3642,1 + 5,9 (a^*) + 17,0 (b^{**}) - 0,10 (ab^*)$	0,66	<0,01
Cevada ⁽¹⁾	-	-	ns
Feijão ⁽¹⁾	-	-	ns
Acumulado	$y = 75,13 + 0,20 (a^{**}) + 0,25 (b^{**}) - 0,002 (ab^*)$	0,74	<0,01

⁽¹⁾ Nenhum efeito foi significativo. ** Significativo a 1% de probabilidade de erro. * Significativo a 5% de probabilidade de erro. ns: não significativo estatisticamente. "a" e "b" representam as camadas de solo 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Apesar da variabilidade observada entre os diferentes cultivos, o fornecimento de P em subsuperfície (camada de 10-20 cm) apresentou respostas positivas. Ganhos em produtividade com a presença de determinado conteúdo de P disponível em camadas subsuperficiais são relatados na literatura (SINGH et al., 2005; OLIVEIRA JUNIOR e CASTRO, 2013; HANSEL et al., 2017a; ZANCANARO et al., 2018; LU et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2020b) e, em muitos casos, são atrelados à ocorrência de períodos com insuficiência hídrica. No presente estudo, a associação entre a resposta no rendimento ao fornecimento de P na camada superficial ou subsuperficial é dificultada, uma vez que não foram realizadas avaliações específicas que pudessem indicar de modo confiável períodos com restrição hídrica. De modo genérico, o cultivo de milho e a segunda safra de soja foram conduzidos sob boa disponibilidade de hídrica e chuvas bem distribuídas. Os demais cultivos enfrentaram períodos com falta de chuvas, havendo prejuízos bem perceptíveis no rendimento do feijoeiro.

Um dos estudos que demonstram a importância da presença de P em subsuperfície, que inclusive estimulou o desenvolvimento do presente trabalho, é apresentado por Oliveira Júnior e Castro (2013). Em cultivo de soja realizado na região central do Brasil, os pesquisadores observaram que, independentemente do conteúdo disponível de P na camada 0-10 cm, apenas foi possível alcançar produtividades acima de 4000 kg ha⁻¹ nas unidades experimentais em que os teores de P na camada de 10-20 cm eram de, ao menos, 10 mg dm⁻³. Estes resultados indicam a importância de haver P em quantidades adequadas abaixo da camada tradicionalmente fertilizada em solos conduzidos sob SPD. Oliveira et al. (2020b), em um estudo de longa duração também conduzido na região Central do Brasil e que avaliou estratégias de adubação, demonstraram que a realização da adubação de correção na camada de 0-20 cm de profundidade é efetiva e resulta em maiores rendimentos de grãos, especialmente nas safras iniciais; segundo os autores, os ganhos nas safras iniciais trazem retorno econômico aos agricultores. Singh et al. (2005), avaliando o rendimento de trigo, alfafa e algodão em função da profundidade de aplicação de P, observaram melhores resultados quando o nutriente foi fornecido em subsuperfície, muito em função da insuficiência de água na superfície do solo. Maiores rendimentos de trigo com a aplicação profunda de P, com relação positiva com a expansão radicular, também foram observados por Kang et al. (2014). Esta resposta positiva foi observada quando utilizada uma cultivar mais resistente à deficiência hídrica; resposta correlacionada ao conteúdo de P em superfície foi obtida quando utilizada uma cultivar menos resistente à falta de água.

A presença de P em maior volume de solo, especialmente abaixo da camada de 10 cm, favorece o processo de absorção pelas raízes das plantas, especialmente em períodos com

restrição hídrica (SINGH et al., 2005). O processo de secamento do solo inicia-se pela camada superficial, que se encontra em maior contato com a atmosfera. Dados obtidos por Reichardt (1985) e apresentados por Lopes et al. (2016) demonstram que, em solo dos Cerrados com >18 % de argila, após 2 dias sem chuva a quantidade de água presente na camada 0-10 cm pode ser insuficiente ao desenvolvimento das plantas. Neste tipo de condição, a planta necessita explorar camadas mais profundas do solo para satisfazer suas necessidades hídricas. A presença de um ambiente subsuperficial quimicamente benéfico, sem elementos tóxicos e com disponibilidade de nutrientes, pode garantir uma arquitetura radicular mais eficiente, com capacidade de adquirir água e nutrientes (FAN et al., 2016; HANSEL et al., 2017b).

Além disso, é necessário destacar que o principal mecanismo de obtenção de P pelas raízes das plantas é a difusão, que ocorre a curtas distâncias. A presença de P e de água próximos às raízes favorece a absorção do nutriente pelas plantas (ARAÚJO; MACHADO, 2006; SANTOS et al., 2008a; ZANCANARO et al., 2018). O processo de difusão também é desfavorecido sob condições de baixas temperaturas; nestes casos, maior volume de solo com presença de P favorecerá a obtenção do nutriente pelas plantas; este fato pode explicar a melhor resposta da cultura do trigo (safra 2018) à adubação fosfatada corretiva em subsuperfície (VIEIRA et al., 2015; ALLEY et al., 2009).

Os benefícios de realizar uma adubação corretiva de P em maiores profundidades de solo podem ser, por vezes, contrabalanceados pelos custos. Apesar de teoricamente viável, a aplicação de fertilizantes em camadas abaixo dos 10 cm, sem revolvimento do solo, é operacionalmente difícil, uma vez que exige máquinas apropriadas e elevado consumo de combustíveis. Com isso, a principal maneira de adicionar P em camadas subsuperficiais é a distribuição em superfície e posterior incorporação. Esta prática apresenta ao menos dois importantes inconvenientes: i) elevadas quantidades de fertilizantes para alcançar os níveis considerados adequados e, ii) necessidade de revolvimento do solo. O primeiro fator limitante refere-se às altas quantidades de P exigidas pelos solos com maior capacidade de adsorção específica do nutriente, como os de alto conteúdo de argila, exigindo um grande dispêndio de recursos financeiros. Solos de alta capacidade sortiva podem exigir cerca de 70,0 kg de P_2O_5 ha⁻¹ para aumentar a disponibilidade no solo em apenas 1 mg dm⁻³ (ROGERI et al., 2016). Por esta razão, muitos agricultores ainda optam pela correção gradual, realizada de modo parcelado e com distribuição dos fertilizantes na linha de semeadura. No segundo fator limitante, a necessidade de revolvimento de um solo cultivado e já estabilizado sob SPD pode favorecer a escolha pelo método de correção gradual. Além dos custos, o contato dos grânulos do

fertilizante com elevado volume do solo pode ser tecnicamente menos eficiente do que a aplicação mais localizada (Lu et al., 2018).

Há estudos que demonstram não haver efetividade em distribuição profunda de P. Fernández e White (2012), avaliando o rendimento de milho e soja sob diferentes condições de aplicação de P e K e sua relação com o conteúdo destes nutrientes, de água e de raízes em diferentes camadas do solo, não observaram ganhos com a aplicação de nutrientes em subsuperfície. Segundo os autores, grande parte das raízes concentra-se nas camadas mais superficiais do solo; além disso, o conteúdo de água até a camada de 0-5 cm, mesmo sofrendo maior variação em comparação a camadas mais profundas, é mais rapidamente reestabelecido com as chuvas.

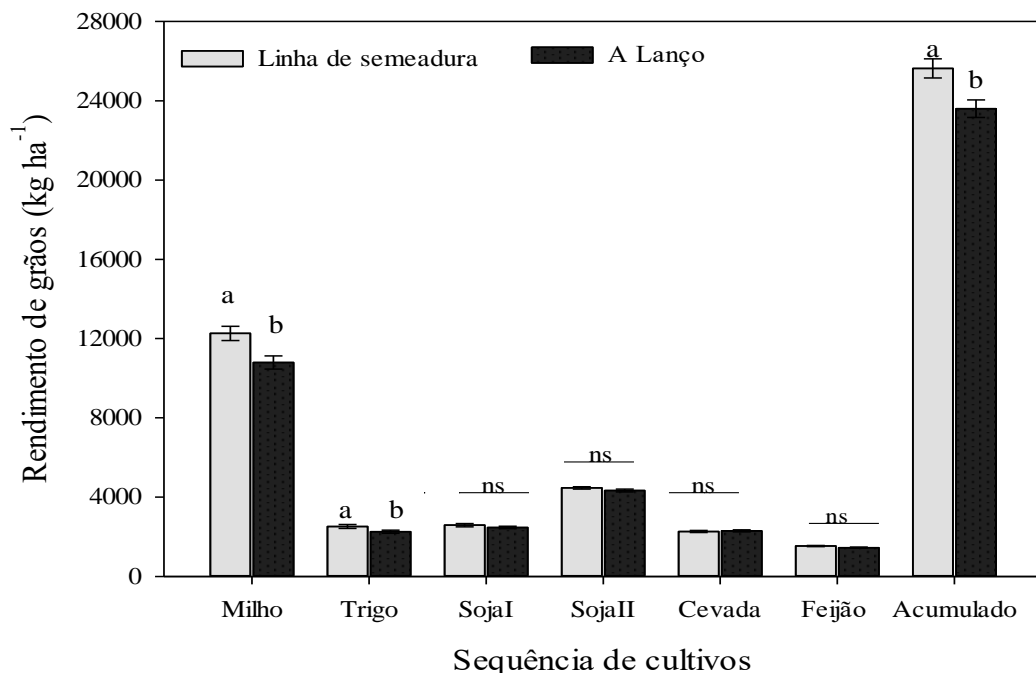
A adubação fosfatada na linha de semeadura garantiu maiores produtividades de milho e trigo em comparação à adubação a lanço (Figura 6). Por outro lado, os rendimentos de ambos os cultivos de soja, de cevada e de feijão não variaram em função dos modos de aplicação de P. Os ganhos de rendimento pela adubação localizada foram de 11,4 e 11,9 % para milho e trigo, respectivamente. Considerando o rendimento acumulado, a adubação na linha de semeadura garantiu ganho de 8,6% em comparação à adubação a lanço.

De modo geral, com base nos rendimentos dos 6 cultivos, observa-se que os maiores benefícios técnicos com a aplicação do P na linha de semeadura ocorrem nos primeiros cultivos. A adubação localizada minimiza a quantidade de solo que entra em contato com os grânulos de adubo e isso pode contribuir com o melhor desenvolvimento das plantas (KEPLER; ANGHINONI, 1995; SANTOS et al., 2008b; NKEBIWE et al., 2016; LU et al., 2018). Essa melhor resposta da adubação fosfatada na linha de semeadura ocorre, principalmente, em solos sob disponibilidade insuficiente de P (ALAM et al., 2018; ZANCANARO et al., 2018).

A equivalência em termos de rendimento entre as aplicações na linha de semeadura e a lanço com o passar dos cultivos é também observada em outros estudos e está muito relacionado ao progressivo acúmulo de P no solo, aumentando as quantidades disponíveis do nutriente às plantas e, conseqüentemente, reduzindo as respostas à adubação (POTTKER, 1999; PAVINATO; CERETTA, 2004; RESENDE et al., 2016; SOUSA; REIN, 2011; SOUSA et al., 2016; ZANCANARO et al., 2018). Em solos sob disponibilidade de P suficiente, as diferentes formas de fornecimento do nutriente, bem como a própria ausência de adubação, apresentam resultados equivalentes (PAVINATO; CERETTA, 2004; ZANCANARO et al., 2018; YUAN et al., 2020). Adicionalmente, os próprios processos de semeadura contribuem para um mínimo revolvimento do solo e conseqüente incorporação do P doravante aplicado a lanço e não absorvido pelas plantas.

Entretanto, a resposta técnica não pode ser usada isoladamente para a escolha de um ou outro modo de adubação. Mesmo garantindo maior eficiência operacional, a deposição dos fertilizantes na superfície do solo, sem incorporação, apresenta ao menos dois grandes riscos: i) perdas de P, ou qualquer outro nutriente, por escoamento superficial (PAVINATO; CERETTA, 2004; FISCHER et al., 2018; DALL'ORSOLETTA et al., 2021) e ii) formação de um forte gradiente de P apenas em superfície, especialmente em solos com alta capacidade de adsorção do nutriente (BARBOSA et al., 2015; HANSEL et al., 2017b; NUNES et al., 2020). Especialmente na região Sul do Brasil, que apresenta predomínio de solos com relevo acidentado, a prática da adubação a lanço apresenta grandes riscos de perdas e deve ser evitada. Já o acúmulo de P nos centímetros superficiais de solo é um fator limitante que deve ser considerado em regiões com histórico de ocorrência de períodos de déficit hídrico durante o desenvolvimento das plantas, uma vez que a falta de P em subsuperfície pode trazer perdas de rendimento.

Figura 6 - Rendimento de grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada, feijão e rendimento acumulado em função da adubação fosfatada realizada na linha de semeadura ou a lanço.



Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. ns: não significativo estatisticamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

5.2.2 Peso de 1000 grãos

O peso de 1000 grãos praticamente não foi influenciado pelas doses e técnicas de adubação (Tabela 2). Apenas houve alteração do peso de grãos da cultura do trigo, na qual a

adição de 130 kg de P_2O_5 ha^{-1} , em comparação à condição sem correção, permitiu incrementos de 4,4% no peso de 1000 grãos, independentemente da camada fertilizada. Para milho, sojaI, sojaII, cevada e feijão os valores médios de peso de 1000 grãos, independentemente da dose ou da camada fertilizada, foram de 328,3, 177,2, 195,8, 39,1 e 289,1 g, respectivamente.

Tabela 2 - Peso de 1000 grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada e feijão em função de doses de correção de P aplicadas nas camadas de 0-10 e 10-20 cm.

Doses de P_2O_5	Camada de amostragem		Camada de amostragem	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
	g.....		g.....	
	Milho		Trigo	
0	328,9 ± 2,7	330,5 ± 3,1	47,2 ± 0,6 b	47,1 ± 0,6 b
65	328,9 ± 3,2	328,3 ± 3,5	48,3 ± 0,6 ab	48,4 ± 0,6 ab
130	326,9 ± 3,4	325,7 ± 2,5	49,3 ± 0,3 a	49,2 ± 0,3 a
260	328,7 ± 9,5	328,7 ± 9,5	51,4 ± 0,6	51,4 ± 0,6
	SojaI		SojaII	
0	177,5 ± 1,9	178,0 ± 1,8	194,3 ± 2,0	195,1 ± 2,0
65	176,2 ± 1,9	177,6 ± 1,6	196,4 ± 1,0	196,9 ± 1,7
130	177,6 ± 1,4	175,6 ± 1,8	196,1 ± 1,8	196,6 ± 1,2
260	177,5 ± 1,7	177,5 ± 1,7	196,4 ± 2,6	196,4 ± 2,6
	Cevada		Feijão	
0	38,8 ± 0,3	39,5 ± 0,3	289,2 ± 4,1	289,5 ± 4,8
65	39,6 ± 0,3	39,1 ± 0,3	289,6 ± 4,2	287,2 ± 3,9
130	39,0 ± 0,3	38,8 ± 0,3	286,6 ± 3,9	288,6 ± 3,4
260	38,9 ± 0,5	38,9 ± 0,5	290,9 ± 9,3	290,9 ± 9,3

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. A ausência de letras indica não ocorrência de diferenciação estatística. Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os modos de aplicação de P, seja na linha ou a lanço, não alteraram o peso de 1000 grãos (Tabela 3). Em média, independentemente da forma de aplicação, os valores do peso de 1000 grãos foram de 328,2, 48,2, 177,0, 195,9, 39,1 e 288,5 para os cultivos com milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada e feijão, respectivamente.

Tabela 3 - Peso de 1000 grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada e feijão em função da adubação fosfatada na linha de semeadura e a lanço.

Modo de aplicação	Milho	Trigo	SojaI	SojaII	Cevada	Feijão
	g.....					
Lanço	330,7 ± 2,8	48,1 ± 0,5	176,7 ± 1,4	196,3 ± 1,2	39,2 ± 0,3	290,8 ± 3,7
Linha	325,7 ± 2,1	48,4 ± 0,4	177,4 ± 1,4	195,5 ± 1,5	39,0 ± 0,2	286,2 ± 2,8

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. A ausência de letras indica não ocorrência de diferenciação estatística. Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Relacionando todas as doses de P aplicadas (correção + reposição), na camada 0-10 e na camada 10-20 cm, apenas houve efeito significativo para os cultivos de milho e trigo (Tabela 4). Em ambos os cultivos, os ganhos no peso dos grãos foram superiores quando a adubação fosfatada foi realizada na camada subsuperficial do solo.

Tabela 4 - Regressões múltiplas em função da interação entre as doses de P aplicadas nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm, com base no peso de 1000 grãos obtido nos diferentes cultivos.

Cultura	Equação	R ²	p
Milho	$y = 75,13 + 0,025 (a^{**}) + 0,25 (b^{**}) - 0,002 (ab^*)$	0,74	<0,01
Trigo	$y = 45,44 + 0,0008 (a^{2**}) + 0,08 (b^{**}) - 0,001 (ab^{**})$	0,84	<0,01
SojaI	ns	-	-
SojaII	ns	-	-
Cevada ⁽¹⁾	ns	-	-
Feijão	ns	-	-

⁽¹⁾ Nenhum efeito foi significativo. ** Significativo a 1% de probabilidade de erro. * Significativo a 5% de probabilidade de erro. ns: não significativo estatisticamente. "a" e "b" representam as camadas de solo 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

5.2.3 Concentração e exportação de P pelos grãos

As concentrações de P nos grãos apresentaram incrementos com a adubação fosfatada corretiva para os cultivos de milho, cevada e feijão (Tabela 5). Para o milho, cevada e feijão, a adição de 65 e/ou 130 kg de P₂O₅ ha⁻¹ na camada superficial permitiu incrementos médios de 23,7, 5,9 e 8,1 % em comparação à condição controle. Para a cevada, houve resposta quando foram adicionados 65 kg de P₂O₅ ha⁻¹ na camada de 10-20 cm, em comparação a não adubação nesta camada, com aumento médio de 8,8%. Para trigo e os dois cultivos com soja, as concentrações médias de P nos grãos, independentemente da dose e camada fertilizada, foram de 3,4, 4,9 e 4,8 g kg⁻¹, respectivamente.

A tabela 5 também apresenta as quantidades de P exportadas da lavoura através dos cultivos de milho, sojaI, cevada e feijão, nos quais houve variações estatísticas simples em função das camadas fertilizadas. No cultivo inicial, a quantidade de P exportada pelos grãos de milho, tendo por base de comparação às condições em que não houve adubação de correção, obteve incrementos de 35,5% quando adicionados 65 ou 130 kg de P₂O₅ ha⁻¹ na camada 0-10 cm, e 20,5% quando adicionados 130 kg de P₂O₅ ha⁻¹ em subsuperfície. No primeiro cultivo com soja, quando a adubação corretiva foi realizada com a dose de 130 kg de P₂O₅ ha⁻¹ na camada de 10-20 cm, houve aumento de 27,8% na quantidade de P exportada, em comparação à condição de não correção desta faixa de solo. Por outro lado, no cultivo de cevada, houve comportamento inverso, no qual houve aumentos no conteúdo exportado do nutriente pelos grãos apenas quando foram adicionados 65 kg de P₂O₅ ha⁻¹ na camada de 0-10 cm, sendo este ganho de 17,6% em relação ao controle. No último cultivo, realizado com feijão, a adição de 130 kg de P₂O₅ ha⁻¹ permitiu incrementos no P exportado em 12,7% quando adicionada na camada de 0-10 cm, em comparação à condição sem aplicação, e 12,5% quando realizada na camada subsuperficial, em comparação à média da resposta obtida entre o controle e a dose mais baixa do fertilizante.

Tabela 5 - Concentração e quantidade de P exportado pelos grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada e feijão, em função das doses de correção de P aplicadas nas camadas de 0-10 e 10-20 cm.

Doses de P ₂ O ₅	Camada de amostragem		Camada de amostragem	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
	g kg ⁻¹		kg ha ⁻¹	
	Milho		Milho	
0	1,9 ± 0,1 b	2,2 ± 0,1	20,7 ± 1,1 b	23,4 ± 1,4 b
65	2,3 ± 0,1 a	2,2 ± 0,1	26,2 ± 1,4 a	25,0 ± 1,6 ab
130	2,4 ± 0,1 a	2,3 ± 0,1	29,9 ± 1,1 a	28,2 ± 1,3 a
260	2,6 ± 0,2	2,6 ± 0,2	32,5 ± 1,3	32,5 ± 1,3
	Trigo		Trigo*	
0	3,4 ± 0,1	3,4 ± 0,1	-	-
65	3,3 ± 0,1	3,3 ± 0,1	-	-
130	3,4 ± 0,1	3,3 ± 0,1	-	-
260	3,5 ± 0,2	3,5 ± 0,2	-	-
	SojaI		SojaI	
0	4,6 ± 0,2	4,5 ± 0,2	11,5 ± 0,8	10,8 ± 0,5 b
65	5,0 ± 0,2	5,0 ± 0,2	12,1 ± 0,7	12,4 ± 0,6 ab
130	5,0 ± 0,2	5,1 ± 0,2	13,3 ± 0,5	13,8 ± 0,8 a
260	5,9 ± 0,4	5,9 ± 0,4	18,8 ± 1,9	18,8 ± 1,9
	SojaII		SojaII*	
0	4,5 ± 0,1	4,9 ± 0,1	-	-
65	4,7 ± 0,1	4,7 ± 0,1	-	-
130	5,2 ± 0,1	4,9 ± 0,1	-	-
260	4,6 ± 0,1	4,6 ± 0,1	-	-
	Cevada		Cevada	
0	3,4 ± 0,1 b	3,4 ± 0,1 b	7,4 ± 0,2 b	7,7 ± 0,3
65	3,6 ± 0,1 a	3,7 ± 0,1 a	8,7 ± 0,2 a	8,4 ± 0,4
130	3,6 ± 0,1 a	3,6 ± 0,1 ab	8,3 ± 0,4 ab	8,3 ± 0,2
260	4,4 ± 0,1	4,4 ± 0,1	10,8 ± 0,5	10,8 ± 0,5
	Feijão		Feijão	
0	3,7 ± 0,1 b	3,8 ± 0,1	5,6 ± 0,2	5,6 ± 0,1 b
65	3,9 ± 0,1 a	3,9 ± 0,1	5,9 ± 0,2	5,8 ± 0,2 ab
130	4,1 ± 0,1 a	4,0 ± 0,1	6,0 ± 0,1	6,2 ± 0,2 a
260	4,6 ± 0,1	4,6 ± 0,1	7,0 ± 0,3	7,0 ± 0,3

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. A ausência de letras indica não ocorrência de diferenciação estatística. Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A tabela 6 apresenta as quantidades de P exportados pelos grãos de trigo e soja (segunda safra) em função dos efeitos de interação da adubação nas duas camadas. Para a gramínea, houve aumento médio de 72,0% quando foram adicionados 65 ou 130 kg de P₂O₅ ha⁻¹ na camada subsuperficial, porém apenas na condição em que não foi adicionado fertilizante fosfatado na camada de 0-10 cm. Na soja, safra 2018/2019, os principais incrementos foram obtidos nas condições em que 130 kg de P₂O₅ ha⁻¹ foram aplicados, seja na camada 0-10 ou 10-20 cm, sempre em condições nas quais a camada oposta não foi fertilizada ou recebeu a dose mais baixa; em média, os aumentos de P exportado pelos grãos de trigo e soja com a adição de 130 kg de P₂O₅ ha⁻¹ foram de 26,8 e 19,8% nas camadas 0-10 e 10-20 cm, respectivamente. Adicionalmente, com base na condição em que foram aplicados 130 kg de P₂O₅ ha⁻¹ na camada

0-10 cm, a adição de 130 kg de P_2O_5 ha^{-1} em subsuperfície aumentou em 12,6% a quantidade de P exportado em relação à aplicação da dose mais baixa do nutriente.

Com exceção às doses aplicadas na camada de 0-10 cm no cultivo inicial, não houve aumentos da concentração de P nos grãos em resposta às quantidades aplicadas. Por outro lado, as quantidades exportadas, em geral, foram maiores quando maiores doses de fertilizante fosfatado foram aplicadas. Resultados similares foram obtidos por Fernández e White (2012) e Yuan et al. (2020), indicando que as quantidades de nutrientes exportados possuem uma relação mais estreita com o rendimento de grãos, em comparação à concentração nestes. O conhecimento das taxas exportadas dos nutrientes é importante, na medida em que é uma ferramenta útil para reabastecimentos e ajustes na fertilidade do solo (YUAN et al., 2020).

Tabela 6 - Quantidades de P exportado pelos grãos de trigo e sojaII em função de efeito de interação entre as doses de correção de P aplicadas nas camadas de 0-10 e 10-20 cm.

Dose de P na camada 0-10 cm	Dose de P na camada 10-20 cm			
	0	65	130	260
.....kg ha^{-1}				
Trigo				
0	4,9 ± 0,4 b B	8,0 ± 0,9 A	8,9 ± 0,3 A	-
65	7,6 ± 0,9 a	8,0 ± 0,8	8,2 ± 0,5	-
130	9,0 ± 0,4 a	8,3 ± 0,5	8,7 ± 0,4	-
260	-	-	-	9,6 ± 0,4
SojaII				
0	17,7 ± 1,1 b B	19,2 ± 0,4 B	22,1 ± 1,4 A	-
65	20,0 ± 0,6 b	20,9 ± 0,5	21,6 ± 0,5	-
130	23,9 ± 1,1 a AB	21,5 ± 0,4 B	24,2 ± 1,2 A	-
260	-	-	-	26,4 ± 0,3

Letras minúsculas diferentes representam diferenças estatísticas das doses aplicadas na camada de 0-10 cm dentro de cada uma das doses de 10-20 cm. Letras maiúsculas diferentes representam diferenças estatísticas das doses aplicadas na camada de 10-20 cm dentro de cada uma das doses de 0-10 cm. Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Relacionando todas as doses de P aplicadas (correção + reposição), na camada 0-10 e na camada 10-20 cm, houve efeitos significativos para todos os cultivos, tanto para as concentrações como para as quantidades exportadas de P (Tabela 7). As variações observadas nas concentrações de P nos grãos em função das doses aplicadas são extremamente baixas, indicando que, neste estudo, o conteúdo do nutriente é relativamente estável, independentemente da adição de fertilizantes. As quantidades de P exportadas pelos grãos de milho, bem como as quantidades exportadas acumuladas, foram influenciadas de modo mais significativo quando a adubação fosfatada foi realizada na camada de 0-10 cm, enquanto trigo, sojaI, sojaII e feijão apresentaram maiores alterações com o fornecimento de P em subsuperfície.

Tabela 7 - Regressões múltiplas em função da interação entre as doses de P aplicadas nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm, considerando a concentração nos grãos e a quantidade de P exportado pelos diferentes cultivos.

Cultura	Equação	R ²	p
Concentração de P			
Milho	$y = 2,03 + 0,006 (a^{**})$	0,52	<0,01
Trigo	$y = 3,2 - 0,0001 (a^{2**}) + 0,0001 (b^{2**}) + 0,0002 (ab^{**})$	0,53	<0,05
SojaI	$y = 4,8 + 0,0001 (ab^{**})$	0,46	<0,01
SojaII	$y = 4,40 + 0,00005 (a^{2**})$	0,56	<0,01
Cevada ⁽¹⁾	$y = 3,42 + 0,00005 (ab^{**})$	0,70	<0,01
Feijão	$y = 3,04 + 0,006 (a^{**}) + 0,002 (b^{*})$	0,81	<0,01
P exportado			
Milho	$y = 18,2 + 0,27 (a^{**}) - 0,002 (a^{2**}) + 0,08 (b^{**})$	0,84	<0,01
Trigo	$y = 5,72 + 0,0006 (a^{2*}) + 0,07 (b^{**}) - 0,001 (ab^{*})$	0,61	<0,05
SojaI	$y = 9,02 + 0,03 (a^{*}) + 0,05 (b^{**})$	0,72	<0,01
SojaII	$y = 15,64 + 0,0005 (a^{2**}) + 0,13 (b^{**}) - 0,001 (ab^{*})$	0,73	<0,01
Cevada ⁽¹⁾	$y = 7,73 + 0,0001 (ab^{**})$	0,55	<0,01
Feijão	$y = 4,56 + 0,007 (a^{*}) + 0,01 (b^{**})$	0,76	<0,01
Acumulado	$y = 59,46 + 0,30 (a^{*}) + 0,27 (b^{**}) - 0,002 (ab^{**})$	0,93	<0,01

⁽¹⁾ Nenhum efeito foi significativo. ** Significativo a 1% de probabilidade de erro. * Significativo a 5% de probabilidade de erro. ns: não significativo estatisticamente. "a" e "b" representam as camadas de solo 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A adubação na linha de semeadura permitiu aumento de 14,9% na exportação de P pelos grãos de trigo, enquanto a adubação a lanço representou aumento de 2,8% na concentração de P nos grãos de cevada, sempre se realizando comparações com o modo de adubação oposto (Tabela 8). Nos demais cultivos, em média, as concentrações de P nos grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII e feijão foram 2,2, 3,4, 4,8, 4,8 e 4,0 g kg⁻¹, respectivamente. Já as quantidades médias de P exportado, independentemente do modo de aplicação, a lanço ou na linha de semeadura, foram de 25,6, 12,3, 21,2, 8,2 e 5,8 kg ha⁻¹ para os cultivos de milho, soja1, sojaII, cevada e feijão, respectivamente.

Tabela 8 - Concentração e quantidade de P exportado pelos grãos de milho, trigo, sojaI, sojaII, cevada e feijão em função da adubação fosfatada na linha de semeadura e a lanço.

Modo de aplicação	Milho	Trigo	SojaI	SojaII	Cevada	Feijão
Concentração de P, g kg ⁻¹						
Lanço	2,2 ± 0,1	3,3 ± 0,1	5,0 ± 0,2	4,8 ± 0,1	3,6 ± 0,1 a	4,0 ± 0,1
Linha	2,2 ± 0,1	3,4 ± 0,1	4,7 ± 0,2	4,8 ± 0,1	3,5 ± 0,1 b	3,9 ± 0,1
P exportado, kg ha ⁻¹						
Lanço	24,4 ± 1,3	7,4 ± 0,3 b	12,5 ± 0,6	21,0 ± 0,6	8,3 ± 0,2	5,8 ± 0,1
Linha	26,7 ± 1,1	8,5 ± 0,4 a	12,1 ± 0,6	21,5 ± 0,5	8,0 ± 0,2	5,9 ± 0,1

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. A ausência de letras indica não ocorrência de diferenciação estatística. Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

5.2.4 Balanço de P e percentuais de P recuperado

O balanço de P, resultante da diferença entre as quantidades totais aplicadas e os montantes exportados pelos grãos, independentemente da camada fertilizada, variou em função das doses aplicadas (Tabela 9). Mesmo nos tratamentos que não receberam adubação de correção, seja na camada 0-10 cm ou 10-20 cm, o balanço foi positivo, fruto das quantidades do nutriente adicionadas como forma de reposição, a partir do segundo cultivo. Este excedente de P nos tratamentos sem adubação corretiva não podem ser interpretados como uma ausência de efetividade da prática, uma vez que os menores rendimentos de grãos obtidos, em comparação aos demais tratamentos, resultaram em baixas quantidades de P exportadas (NUNES et al., 2020). O balanço médio entre os modos foi de 73,7 e 76,9 para os modos na linha de semeadura e a lanço, respectivamente.

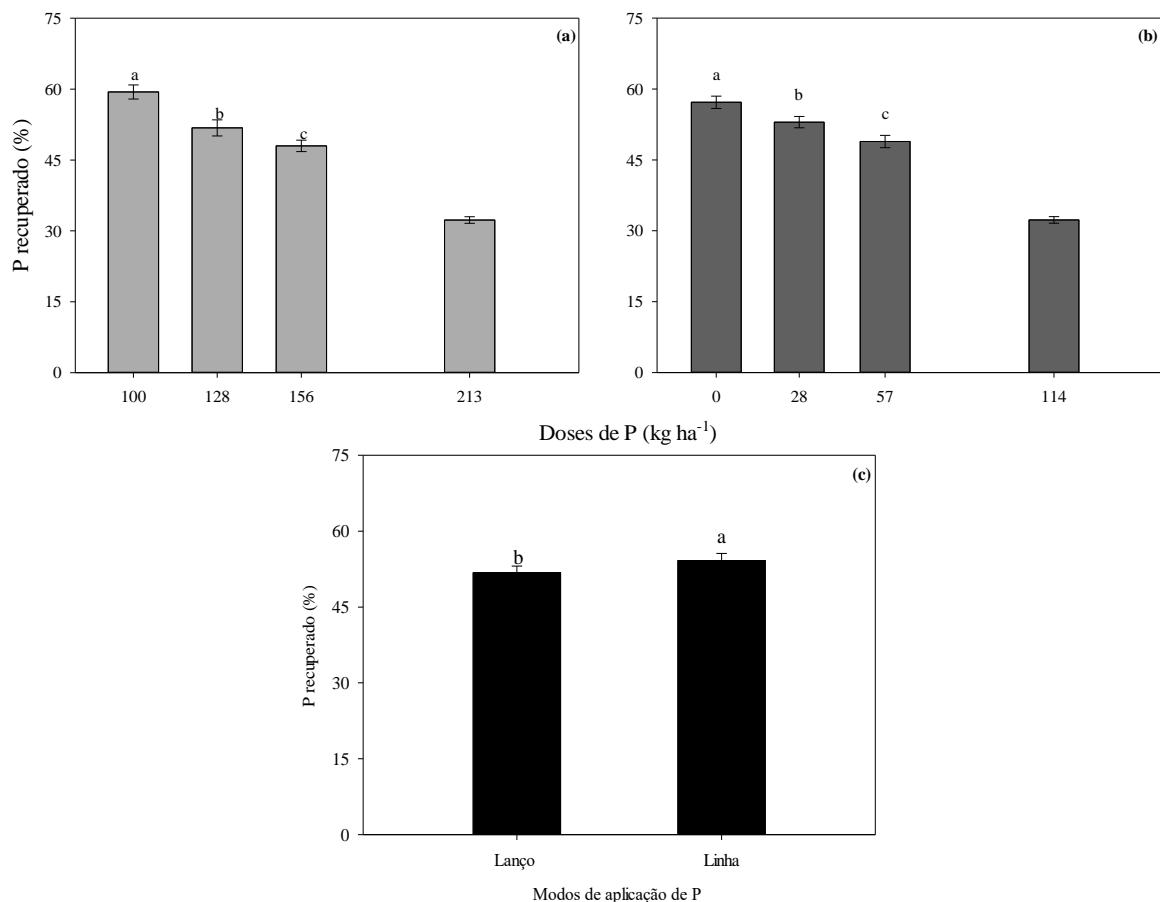
Tabela 9 - Balanço de P no solo (Total aplicado – Total exportado) ao final do estudo, em função das doses de P aplicadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm.

Dose de P na camada 0-10 cm	Dose de P na camada 10-20 cm	Balanço 0-10	Balanço 10-20
	kg ha ⁻¹		
99,6	0,0	52,8 b	55,8 c
127,9	28,4	76,1 c	74,7 b
156,3	56,8	97,0 a	95,4 a
213,1	113,5	221,2	221,2

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%.
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Houve redução nos percentuais de P exportado, ou seja, retirados da lavoura via exportação de grãos, com o aumento das quantidades aplicadas do nutriente (Figura 7). Em média, foram recuperados 60% do P aplicado na condição sem adubação de correção, sendo que este valor cai para cerca de 45% nas condições em que foram aplicadas doses de P suficientes para alcançar o nível crítico. Comparando os modos de aplicação do nutriente, a adubação localizada, na linha de semeadura, permitiu recuperação de 4,4% a mais em comparação à adubação a lanço. O aumento das doses de P aplicadas acaba refletindo, normalmente, em maiores excedentes no solo (YUAN et al., 2020). Em relação aos modos de aplicação, o fornecimento de P localizadamente, próximo às raízes, pode favorecer a absorção e acarretar maior percentual recuperado através das colheitas (LU et al., 2019; ROSA et al., 2020).

Figura 7 - Percentuais de P recuperado em função das quantidades totais do nutriente aplicadas nas camadas 0-10 (a) e 10-20 cm (b) e em função dos modos de aplicação (c).

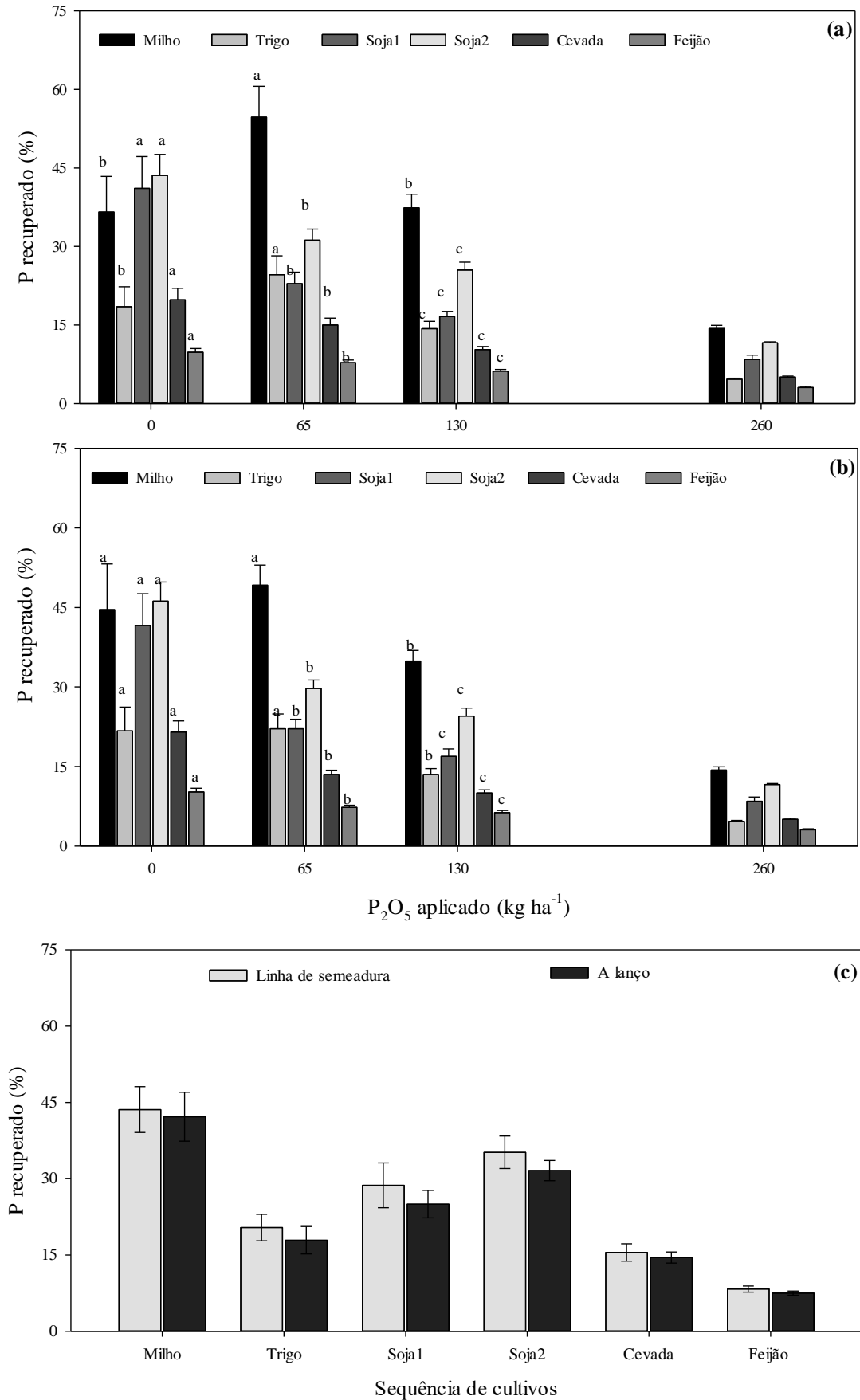


Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. Os valores indicados no eixo x das figuras "a" e "b" representam as quantidades totais de P adicionadas entre 2016-2020.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Observando o comportamento de recuperação de P ao longo dos cultivos sucessivos, apesar da variabilidade inerente em função da demanda diferenciada de cada espécie e do rendimento alcançado, o comportamento se assemelha ao decorrente dos dados acumulados (Figura 8). Além disso, destaca-se um comportamento já bem destacado na literatura: as quantidades recuperadas ao longo dos cultivos vão reduzindo e este é acumulado no solo (NUNES et al., 2020; YUAN et al., 2020), ficando, pelo menos parcialmente, passível de ser utilizado nos cultivos posteriores. Ao mesmo tempo, fica suscetível a perdas, especialmente por escoamento superficial se aplicado superficialmente e sob terrenos mais inclinados (DALL'ORSOLETTA et al., 2021).

Figura 8 - Percentuais de P exportado, em cada um dos cultivos, em função das quantidades do nutriente aplicadas nas camadas 0-10 (a) e 10-20 cm (b) e em função dos modos de aplicação (c).



Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. A ausência de letras indica não ocorrência de diferenciação estatística.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

5.2.5 Atributos químicos do solo

Os valores de P extraídos por Mehlich 1 aumentaram no solo de acordo com as quantidades de fertilizante fosfatado aplicadas na correção (Tabela 10), realizada previamente ao primeiro cultivo. Na camada 0-10 cm o enriquecimento manteve-se ao longo do tempo, enquanto para a camada subsuperficial houve comportamento diferenciado. Considerando o tratamento que não recebeu a adubação de correção, os teores de P na camada 0-10 cm, inicialmente próximos a 9 mg dm^{-3} , apresentaram um aumento de 2,4 vezes, enquanto na camada 10-20 os valores mantiveram-se muito similares, com média de $5,9 \text{ mg dm}^{-3}$. Quando são consideradas as doses maiores, ocorre um comportamento diferenciado: enquanto os teores na camada superficial aumentam, com as doses de reposição, numa magnitude inferior ao observado para o tratamento controle, há um empobrecimento da camada de 10-20 cm, o qual é mais intenso quanto maior as doses de correção aplicadas nesta fração de solo.

Na primeira coleta de solo, a adubação na linha de semeadura resultou em teores de P de 9,2, 15,0 e $26,4 \text{ mg dm}^{-3}$, enquanto para a adubação a lanço os teores foram 8,4, 14,5 e $20,4 \text{ mg dm}^{-3}$, para as doses de 0, 65 e $130 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente. Dentre estes valores, a disponibilidade foi estatisticamente superior para a maior dose aplicada na linha, em comparação ao fornecimento a lanço. Nas demais coletas não houve diferenciação dos teores disponíveis de P em função dos modos de aplicação (dados não apresentados).

Em função das adubações de reposição e da não recuperação, através das colheitas, de todo o P aplicado, houve aumentos graduais dos teores disponíveis de P, independentemente das doses corretivas. Por outro lado, houve redução do conteúdo de P considerado lábil na camada 10-20 cm, observado para todas as doses corretivas aplicadas. Este empobrecimento dos teores de P criados pela adubação de correção em subsuperfície deve-se, em especial, a quatro fatores: i) ausência de adubações posteriores, ii) adsorção aos sítios presentes nas partículas sólidas do solo, iii) absorção pelas raízes das plantas e iv) adensamento do solo com o tempo. Os dois primeiros pontos referem-se à elevada capacidade sortiva e baixa mobilidade do P no solo (NUNES et al., 2011; LU et al., 2019; NUNES et al., 2020). Paralelamente, as quantidades de P em subsuperfície vão sendo exauridas através da extração pelas plantas (fator iii) (FERNÁNDEZ e WHITE, 2012; LI et al., 2017; YUAN et al., 2020). Em relação ao quarto ponto, acredita-se que o adensamento gradual do solo contido na camada até 20 cm com o passar do tempo possa ter levado à coleta de frações de solo não corrigidas. O intenso revolvimento do solo, realizado durante os procedimentos da adubação corretiva, reduz a densidade do solo inicialmente, mas este efeito é passageiro e, ao longo dos cultivos, as

partículas tendem a se ajustar e, em parte, as condições físicas iniciais são reestabelecidas (PEIXOTO et al., 2020).

Na camada 0-10 cm, mesmo sendo adotada filosofia de adubação de reposição, a qual apenas objetiva repor as quantidades dos nutrientes a serem retiradas pela cultura de interesse, o enriquecimento de P ocorreu de modo representativo. A partir do quinto cultivo, em todos os tratamentos foi alcançado o nível crítico do nutriente, estabelecido em 18 mg dm^{-3} de P (CQFS – RS/SC, 2016). Uma vez alcançado o nível crítico, não se esperam ganhos significativos (que resultem em retorno econômico) através da adição de fertilizantes.

Tabela 10 - Disponibilidade de P nas amostras de solo coletadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm, nas quatro coletas realizadas.

Coleta	Camada diagnóstica	Doses de correção - P_2O_5 , kg ha^{-1}			
		0	65	130	260
P Mehlich 1, mg dm^{-3}					
1 (05/2017)	0-10 cm*	$8,8 \pm 0,2$ c	$14,8 \pm 0,6$ b	$23,4 \pm 1,2$ a	$54,6 \pm 1,7$
	10-20 cm	$6,1 \pm 0,4$ c	$9,9 \pm 0,4$ b	$17,6 \pm 0,6$ a	$29,1 \pm 2,2$
2 (05/2018)	0-10 cm	$11,5 \pm 0,5$ c	$14,2 \pm 0,7$ b	$19,8 \pm 1,6$ a	$34,2 \pm 3,2$
	10-20 cm	$5,4 \pm 0,3$ b	$6,8 \pm 0,5$ b	$11,1 \pm 0,5$ a	$17,7 \pm 0,9$
3 (05/2019)	0-10 cm	$22,0 \pm 0,7$ c	$27,7 \pm 1,1$ b	$34,6 \pm 1,2$ a	$40,8 \pm 2,4$
	10-20 cm	$7,1 \pm 0,3$ c	$8,8 \pm 0,4$ b	$14,4 \pm 0,7$ c	$20,1 \pm 1,3$
4 (05/2020)	0-10 cm	$20,7 \pm 0,4$ c	$24,4 \pm 1,0$ b	$29,6 \pm 1,3$ a	$65,0 \pm 7,2$
	10-20 cm	$5,7 \pm 0,1$ c	$7,5 \pm 0,3$ b	$12,8 \pm 0,5$ a	$15,9 \pm 0,6$

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O pH em água apenas foi influenciado pelos tratamentos na primeira coleta de solo realizada, após o cultivo de milho (Tabela 11). Nesta avaliação, houve redução do pH na camada 10-20 cm em função do aumento das doses de fertilizante fosfatada, em uma magnitude de 3,8%, quando comparados os valores obtidos na comparação entre a ausência de correção e a aplicação de $130 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. Esta ligeira redução pode ser atribuída ao poder acidificante do superfosfato triplo (SFT) (ERNANI, 2016), mas não deve ser considerado um fator limitante à utilização deste fertilizante.

Nenhuma influência das doses de P aplicadas foi observada nos valores considerados disponíveis de Ca, independentemente da coleta realizada e da camada amostrada. Apesar de ser um constituinte do fertilizante fosfatado utilizado, as quantidades de Ca adicionadas pelo SFT são reduzidas. A maior dose de SFT aplicada, de 130 kg ha^{-1} de P_2O_5 (300 kg ha^{-1} de SFT) forneceu cerca de 40 kg ha^{-1} de Ca em uma camada de 10 cm de solo, o que representa cerca de 3,8% das quantidades fornecidas, na mesma faixa de solo, pela calagem realizada previamente à instalação do experimento.

Tabela 11 - Valores de pH-H₂O e Ca trocável nas amostras de solo coletadas nas camadas 0-10 e 10-20 cm, nas quatro coletas realizadas.

Coleta	Camada diagnóstica	Doses de correção - P ₂ O ₅ , kg ha ⁻¹			
		0	65	130	260
pH-H ₂ O					
1 (05/2017)	0-10 cm*	5,9 ± 0,0	5,9 ± 0,0	5,9 ± 0,0	5,9 ± 0,0
	10-20 cm	5,2 ± 0,0 a	5,1 ± 0,0 ab	5,0 ± 0,0 b	5,1 ± 0,1
2 (05/2018)	0-10 cm	6,1 ± 0,1	6,1 ± 0,0	6,1 ± 0,0	5,8 ± 0,0
	10-20 cm	5,2 ± 0,1	5,3 ± 0,1	5,3 ± 0,1	4,9 ± 0,0
3 (05/2019)	0-10 cm	5,6 ± 0,0	5,7 ± 0,0	5,7 ± 0,0	5,6 ± 0,1
	10-20 cm	5,1 ± 0,1	5,2 ± 0,1	5,3 ± 0,1	5,0 ± 0,0
4 (05/2020)	0-10 cm	5,8 ± 0,1	5,9 ± 0,1	5,8 ± 0,1	5,8 ± 0,0
	10-20 cm	5,2 ± 0,1	5,3 ± 0,1	5,3 ± 0,1	5,1 ± 0,1
Ca, cmolc dm ⁻³					
1 (05/2017)	0-10 cm*	9,0 ± 0,1	9,1 ± 0,1	8,9 ± 0,1	9,0 ± 0,1
	10-20 cm	5,4 ± 0,3	5,2 ± 0,3	5,0 ± 0,2	5,1 ± 0,3
2 (05/2018)	0-10 cm	7,7 ± 0,2	7,6 ± 0,1	7,8 ± 0,2	6,8 ± 0,2
	10-20 cm	5,3 ± 0,3	5,4 ± 0,3	5,6 ± 0,3	3,9 ± 0,2
3 (05/2019)	0-10 cm	6,7 ± 0,1	6,9 ± 0,1	7,0 ± 0,1	6,7 ± 0,1
	10-20 cm	4,9 ± 0,2	5,0 ± 0,2	5,3 ± 0,2	4,5 ± 0,1
4 (05/2020)	0-10 cm	7,4 ± 0,2	7,3 ± 0,2	7,0 ± 0,2	6,8 ± 0,1
	10-20 cm	4,8 ± 0,2	5,3 ± 0,4	5,0 ± 0,3	4,5 ± 0,4

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo Teste de Tukey, com probabilidade de erro de 5%. A ausência de letras indica não ocorrência de diferenciação estatística. Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

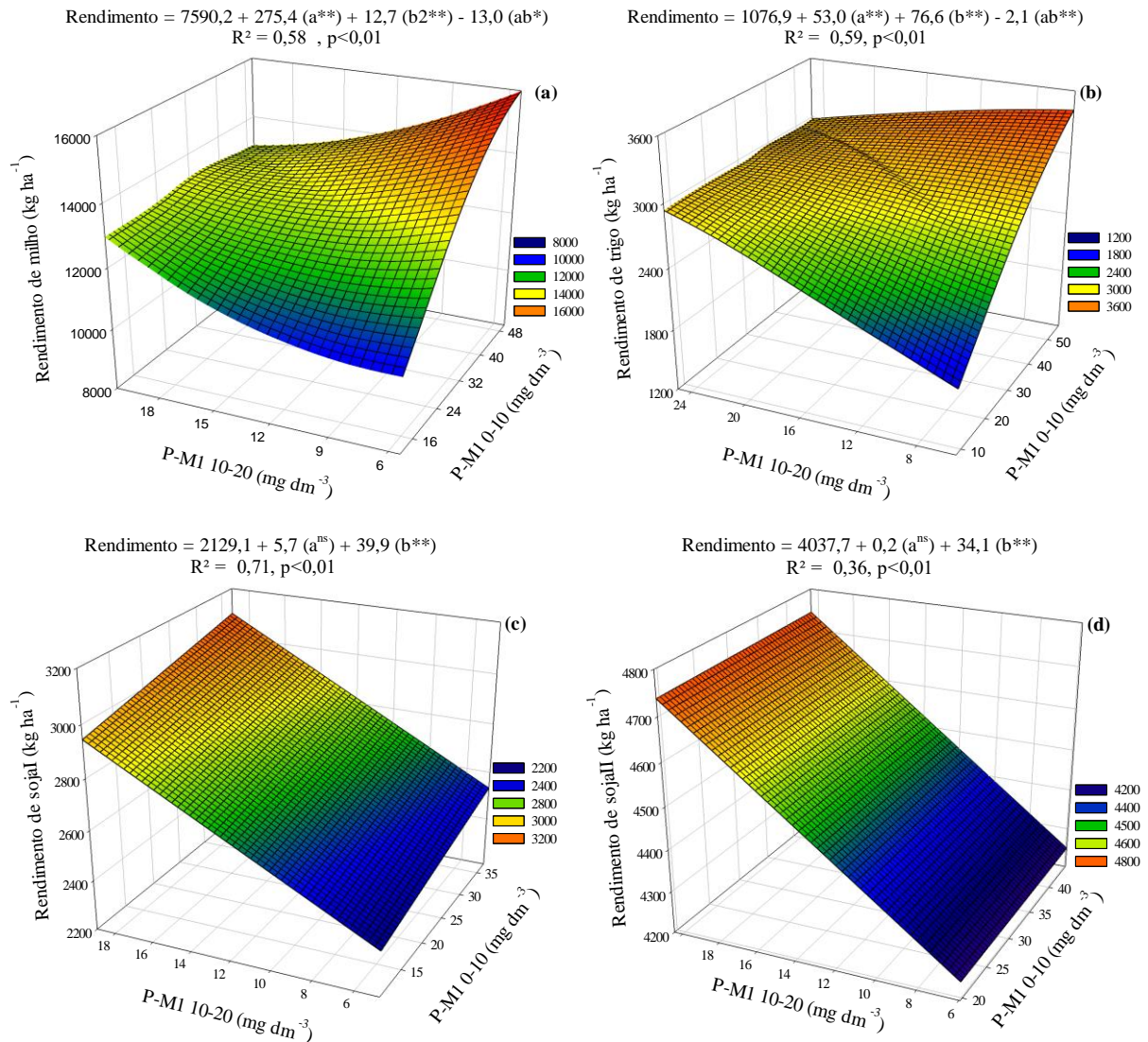
5.2.6 Relação entre os teores de P no solo e o rendimento de grãos

As quantidades de P consideradas disponíveis nas camadas 0-10 e 10-20 cm tiveram relação com o rendimento dos cultivos de milho, trigo, sojaI e sojaII (Figura 9), o que não foi observado para a cevada e o feijão (dados não apresentados). A variação do rendimento de milho teve relação mais estreita com o conteúdo de P na camada de 0-10 cm: seriam necessários aumentos de 3,6 ou 8,9 mg dm⁻³ de P nas camadas 0-10 e 10-20 cm, respectivamente, para aumentar a produtividade de milho em mais 1000 kg ha⁻¹. A partir do segundo cultivo, a camada subsuperficial passa a ser mais responsiva ao aumento em produtividade: seriam necessários 18,9 e 13,0, 175,4 e 25,1 e 5000,0 e 29,3 mg dm⁻³ de P nas camadas 0-10 e 10-20 cm para aumentar as produtividades de trigo sojaI e sojaII em mais 1000 kg ha⁻¹, respectivamente.

Sobre estes resultados, dois pontos importantes merecem maior atenção. Primeiramente, observa-se que a aplicação de P na camada de 0-10 cm vai perdendo capacidade de gerar resposta em termos de produtividade, uma vez que maiores quantidades do nutriente devem ser aplicadas para o mesmo ganho em grãos. Além do potencial genético diferenciado entre as espécies, isto pode estar muito atrelado ao alcance de níveis satisfatórios de P nesta faixa de solo. Segundo aspecto é que, mesmo alcançando, teoricamente, níveis ideais na camada superficial, as plantas continuam a responder às maiores quantidades de P presentes na camada

de 10-20 cm. Estes resultados reforçam a necessidade de consideração, pelo menos sob o ponto de vista técnico, de camadas subsuperficiais para o diagnóstico da fertilidade química dos solos.

Figura 9 - Regressões múltiplas em função da interação entre os teores disponíveis de P disponíveis nas camadas 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b), com base no rendimento de grãos dos cultivos sucessivos.



(¹) Nenhum efeito foi significativo. ** Significativo a 1% de probabilidade de erro. * Significativo a 5% de probabilidade de erro. ns: não significativo estatisticamente. "a" e "b" representam as camadas de solo 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Correlacionando as quantidades de P aplicadas e o conteúdo do nutriente disponível no solo nas camadas 0-10, 10-20 e a camada 0-20 cm (determinada a partir da média entre as duas camadas diagnósticas avaliadas neste estudo), percebe-se, mais uma vez, uma grande variabilidade entre os cultivos (Tabela 12). No primeiro cultivo, com milho, as melhores correlações ocorreram com as doses e o conteúdo disponível de P na camada 0-10 cm e, também, quando é considerada toda a camada arável (0-20 cm). A partir do segundo cultivo, as

melhores correlações ocorrem quando é considerada a camada 10-20 cm. Estes resultados corroboram a ideia de considerar a camada 10-20 cm para diagnóstico das quantidades disponíveis de nutriente no solo, o que foi recentemente mencionado.

Além disso, independentemente do cultivo, observa-se uma boa correlação entre o rendimento de grãos e as doses aplicadas e/ou quantidades disponíveis de P na camada 0-20 cm. Outros estudos, conduzidos no Sul do Brasil, também indicam respostas mais ajustadas em situações que consideram toda a camada arável para diagnóstica da fertilidade química do solo, mesmo o solo sendo conduzido sob sistema de plantio direto (VIEIRA et al., 2015).

Atualmente, o diagnóstico da fertilidade do solo para cultivo de plantas anuais cultivadas sob SPD, nos estados do RS e SC, é realizado com base nos resultados obtidos na camada de 0-10 cm (CQFS – RS/SC, 2016). Recomenda-se, que o produtor analise, rotineiramente, a camada 10-20 para diagnóstico dos níveis de nutrientes e acidez e a camada 20-40 cm para interpretação dos teores de enxofre.

Tabela 12 - Correlações entre o rendimento de grãos e as quantidades de aplicadas e as quantidades de P disponíveis no solo nas camadas 0-10, 10-20 e 0-20 cm, considerando todos os cultivos realizados.

Variáveis	Rendimento de grãos					
	Milho	Trigo	SojaI	SojaII	Cevada	Feijão
P aplicado 0-10 cm	0,60 (**)	0,48 (*)	0,38 (ns)	0,37 (ns)	0,30 (ns)	0,04 (ns)
P aplicado 10-20 cm	0,43 (ns)	0,66 (**)	0,73 (***)	0,80 (***)	0,26 (ns)	0,37 (ns)
P aplicado 0-20 cm	0,67 (**)	0,70 (**)	0,66 (**)	0,74 (***)	0,35 (ns)	0,24 (ns)
P Mehlich1 0-10 cm	0,66 (**)	0,48 (*)	0,36 (ns)	0,47 (*)	0,26 (ns)	0,03 (ns)
P Mehlich 1 10-20 cm	0,45 (*)	0,62 (*)	0,69 (**)	0,70 (**)	0,27 (ns)	0,29 (ns)
P Mehlich 1 0-20 cm	0,71 (**)	0,67 (**)	0,63 (**)	0,66 (**)	0,33 (ns)	0,19 (ns)

***: significativo a 0,1% de probabilidade de erro. **: significativo a 1% de probabilidade de erro. *: significativo a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

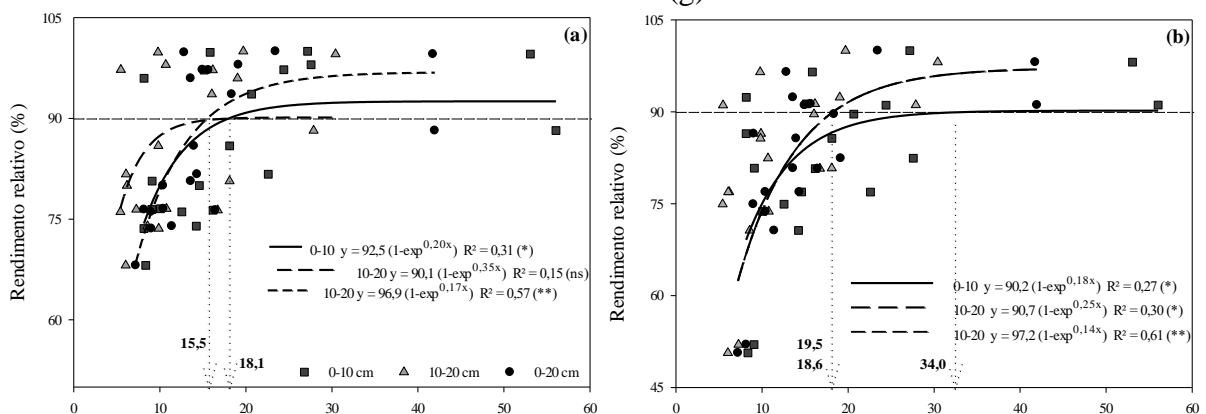
A figura 10 apresenta os teores de P nas camadas 0-10, 10-20 e 0-20 cm necessários para alcançar 90% do rendimento relativo (máximo retorno econômico). Assim como não houve ajustes significativos em determinadas camadas, não houve qualquer resposta para os dois últimos cultivos, com cevada e feijão (dados não apresentados). No primeiro cultivo, com milho, os níveis críticos para as camadas 0-10 e 0-20 cm foram de 15,5 e 18,1 mg dm⁻³, respectivamente; para o trigo, os níveis críticos para as camadas 0-10, 10-20 e 0-20 cm foram de 34,0, 18,6 e 19,5 mg dm⁻³, respectivamente; para os cultivos de sojaI e sojaII, os níveis críticos para as camadas 10-20 e 0-20 cm foram de 13,1 e 16,8 mg dm⁻³ e 8,0 e 16,2 mg dm⁻³, respectivamente. Contemplando todos os rendimentos obtidos neste estudo, os níveis críticos para as camadas 0-10, 10-20 e 0-20 cm foram de 22,2, 12,1 e 17,0 mg dm⁻³, respectivamente.

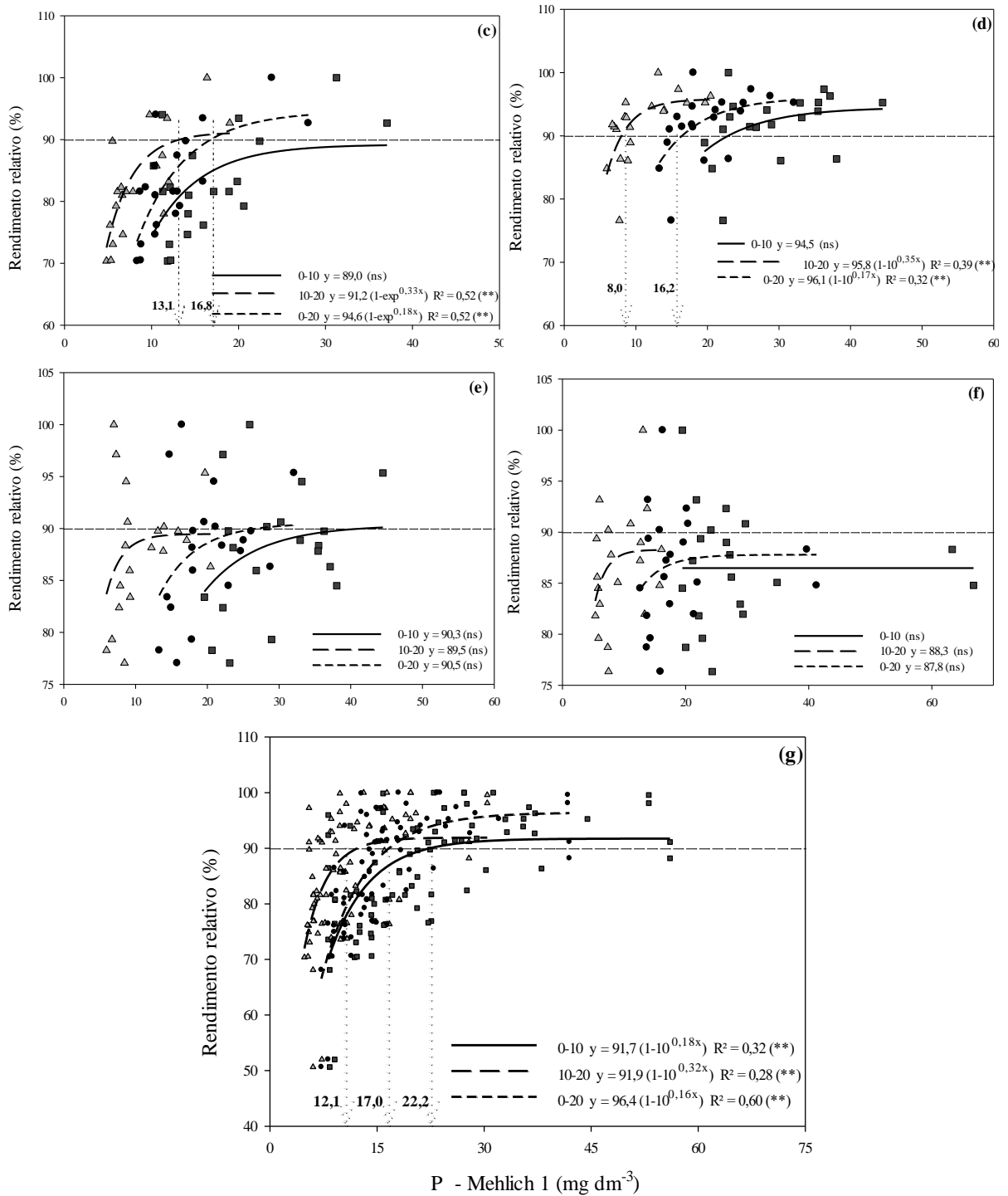
Os teores de P na camada 0-10 cm necessários para alcançar o máximo retorno econômico mantiveram-se relativamente próximos ao nível crítico para o solo, que é de 18 mg dm⁻³. O maior desvio foi observado para o trigo, em que foi observado nível crítico quase duas vezes superior. Apesar de o valor poder ser questionável, é de conhecimento que as culturas invernais, como o trigo, podem exigir valores de P mais altos no solo, muito em função das baixas temperaturas durante o ciclo de cultivo, prejudicando o processo de difusão, bem como por possíveis ocorrências de estiagem (VIEIRA et al., 2015).

Dentro de cada cultivo, os teores críticos sempre foram maiores para a camada 0-10 cm, seguidos pela camada 0-20 e pela camada 10-20 cm. Os maiores valores quando se considera a camada mais superficial são comuns, já que ocorre o acúmulo de altos níveis de P em superfície sob SPD (SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2008), em função das fertilizações sem incorporação e da deposição dos resíduos vegetais em superfície.

Considerando os níveis críticos atualmente vigentes (CQFS – RS/SC, 2016), os valores obtidos no presente estudo foram ligeiramente superiores, contrariando os resultados esperados. Sob SPD, aumentam a atividade biológica do solo e a presença de formas orgânicas de P, as quais podem contribuir com a nutrição das plantas (OLIVEIRA et al., 2020). Paralelamente, formas orgânicas lábeis de P podem não ser totalmente contabilizadas pelo extrator Mehlich 1, como observado por Steffens et al. (2010).

Figura 10 - Relação entre os teores de P Mehlich 1 avaliados nas camadas 0-10, 10-20 e 0-20 cm e os rendimentos relativos de milho (a), trigo (b), sojaI (c), sojaII (d), cevada (e), feijão (f) e acumulado (g).





***: significativo a 0,1% de probabilidade de erro. **: significativo a 1% de probabilidade de erro. *: significativo a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

5.3 CONCLUSÕES

Há resposta positiva das plantas à adubação fosfatada. As magnitudes das respostas, entretanto, reduzem-se com o enriquecimento do solo com P.

A adubação fosfatada na camada 10-20 cm influencia positivamente a resposta das plantas e permite, por vezes, melhor acréscimo em rendimento de grãos em comparação ao fornecimento de fósforo na camada superficial.

A consideração da camada 10-20 cm para recomendação da adubação fosfatada, em conjunto à camada 0-10 cm, pode trazer benefícios à resposta das plantas.

A adubação fosfatada de modo localizado, na linha de semeadura, apresenta melhor resposta técnica, em relação à adubação a lanço, nos cultivos iniciais. A partir do terceiro cultivo, não há diferenciação entre os métodos.

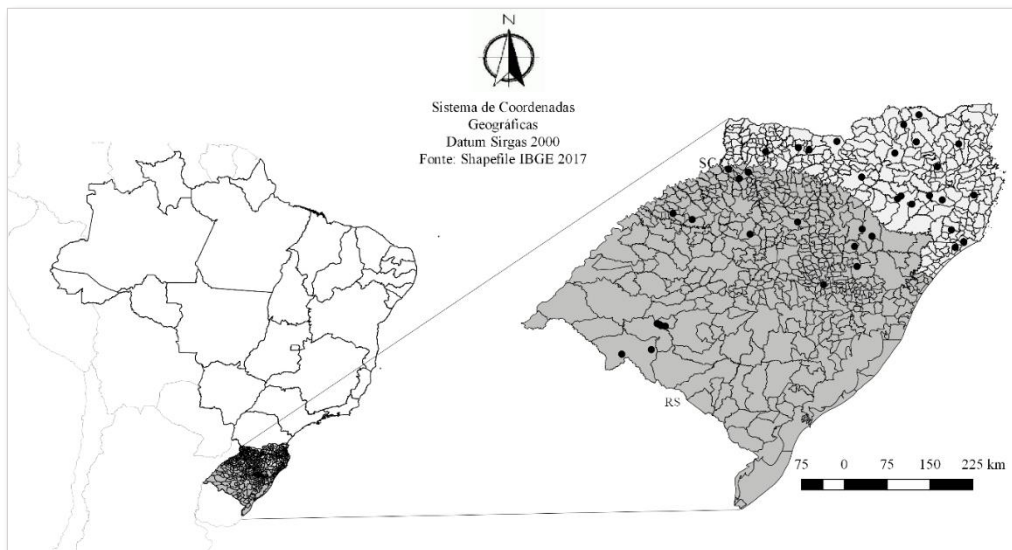
6 EXPERIMENTO 2. VARIAÇÃO DO TAMPONAMENTO DE P EM SOLOS DE TEXTURA E NÍVEIS DE FERTILIDADE CONTRASTES

6.1 MATERIAL E MÉTODOS

6.1.1 Coleta dos solos

Foram coletadas 20 amostras de solos no estado do RS e 21 amostras de solos no estado de SC (Figura 11 e Tabela 13). O critério utilizado para escolha dos solos, além do seu histórico de uso, foi o conteúdo de argila, buscando-se amostrar solos com variada composição textural. As amostras de solo foram coletadas em áreas preservadas, sem interferência antrópica, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, utilizando pá de corte.

Figura 11 - Distribuição espacial dos 41 pontos amostrados nos estados do RS e SC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Tabela 13 - Classificação e localização dos solos coletados nos estados do RS e de SC.

Solo ⁽¹⁾	Coordenadas geográficas	Altitude, m	Solo ⁽¹⁾	Coordenadas geográficas	Altitude, m
RS1-LB	28° 30' 47,2" S 50° 53' 36,9" W	970	SC1-PVA	28°37'1,56" S 49°7'52,95" W	101
RS2-LV	28° 22' 33,4" S 51° 4' 52,9" W	900	SC2-PVA	28°23'25,29" S 49°22'5,27 W	245
RS3-LV	28° 14' 20,1" S 52° 19' 14,8" W	725	SC3-PV	28°43'37,85" S 49°17'43,54" W	33
RS4-LV	28° 28' 25,0" S 53° 14' 7,2" W	475	SC4-PA	26°44'18,16" S 49°13'40,19" W	292
RS5-LV	28° 04' 34,7" S 54°42'53,0" W	218	SC5-CX	27°10'41,26" S 49°38'8,70" W	349
RS6-LV	28° 11' 27,4" S 54°20'44,4" W	342	SC6-CH	27°44'21,78" S 50°20'8,80" W	930
RS7-LV	28° 58' 44,1" S 53° 38' 38,1" W	420	SC7-PVA	26°47'52,77" S 49°5'20,30" W	41
RS8-CX	27° 13' 20,4" S 53° 39' 0,4" W	218	SC8-PVA	27°43'17,59" S 48°56'7,96" W	470
RS9-LV	27° 24' 16,3" S 53° 26' 28,8" W	563	SC9-CH	27°48'55,33" S 49°32'36,71" W	890
RS10-CX	27° 16' 55,4" S 53° 16' 10,0" W	384	SC10-NV	27°43' 53,28" S 49°47' 17,75" W	872
RS11-PBAC	30° 14' 24,1" S 54° 51' 44,5" W	125	SC11-NB	26° 41' 28" S 51°34' 0,79" W	898
RS12-TX	30° 12' 12,7" S 54° 59' 09,2" W	124	SC12-NB	27° 53' 41,8" S 50° 07' 45" W	1130
RS13-FT	30° 13' 25,4" S 54° 56' 58,1" W	115	SC13-NB	26°54'55,30" S 50°27'13,60" W	1075
RS14-PV	30° 13' 51,9" S 54° 56' 45,7" W	140	SC14-LB	26°51'15" S 52°5'57,61 W	1063
RS15-PV	30° 41' 25,2" S 55° 07' 50,9" W	165	SC15-LV	27°22'34,93" S 51°5'26,92" W	939
RS16-TX	30° 11' 26,3" S 55° 1' 10,2" W	172	SC16 - LV	26°48'38,88" S 52°18'21,77" W	686
RS17-RL	30° 46' 41,6" S 55° 41' 55,6" W	100	SC17-CH	27° 47' 38,2" S 50° 24' 09,7" W	980
RS18-LB	28° 42' 26,3" S 51° 13' 38,9 W	873	SC18-LB	26° 22' 05,88" S 50° 16' 57,53" W	805
RS19-CH	29° 5' 34,4" S 51° 10' 51,2" W	747	SC19-CH	26° 10' 46,44" S 49° 59' 25,5" W	885
RS20-PV	29°26'32,87" S 51°49'21,64" W	76	SC20-LV	26°53'8,41" S 52°56'12,37" W	535
-	-	-	SC21-CX	26° 42' 0,7" S 50° 02' 26,7" W	659

⁽¹⁾ De acordo com a classificação proposta pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018). LB: Latossolo Bruno; LV: Latossolo Vermelho; CX: Cambissolo Háplico; PBAC: Argissolo Bruno-Acinzentado; TX: Luvisso Háplico; RL: Neossolo Litólico; CH: Cambissolo Húmico; PV: Argissolo Vermelho; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; PA: Argissolo Amarelo; NV: Nitossolo Vermelho; NB: Nitossolo Bruno. Os solos designados entre RS1 e RS20 foram coletados no estado do Rio Grande do Sul, nas cidades de Vacaria, Lagoa Vermelha, Passo Fundo, Ibirubá, Santo Ângelo, Cerro Largo, Cruz Alta, Pinheirinho do Vale, Taquaruçu do Sul, Iraí, Rosário do Sul, Rosário do Sul, Rosário do Sul, Rosário do Sul, Santana do Livramento, Rosário do Sul, Santana do Livramento, Ipê, Caxias do Sul e Teotônia, respectivamente. Os solos designados entre SC1 e SC21 foram coletados no estado de Santa Catarina, nas cidades Sangão, Lauro Miller, Içara, Pomerode, Rio do Sul, Lages, Blumenau, Rancho Queimado, Bom Retiro, Bom Retiro, Água Doce, Paniel, Santa Cecília, Vargeão, Campos Novos, Faxinal dos Guedes, Lages, Major Vieira, Mafra, Pinhalzinho e Santa Terezinha, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

6.1.2 Caracterização das amostras de solo coletadas

As amostras de solo coletadas foram secadas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm. Posteriormente, foi realizada caracterização química e granulométrica dos solos. Inicialmente foram determinados o pH em água e o pH TSM, utilizando-se o valor deste último para determinar o valor de H+Al. O pH em água (relação solo: água de 1:1) e o Índice TSM (relação solo: água: solução TSM 1:1:0,5) foram determinados em medidor de pH (DM-22, DIGIMED) com eletrodo de pH (DME-CV1, DIGIMED). Para as amostras de solo que apresentaram pH inferior a 6,0, foi realizada determinação da quantidade de calcário necessária para elevar o valor de pH a 6,0 através de incubação.

A incubação foi realizada com 4 doses de calcário: 0, 70, 100 e 130% da necessidade de calcário recomendada pela CQFS – RS/SC (2016) para elevação do pH a 6,0. Para a incubação, foram pesados 50 g de solo em sacos plásticos, adicionada a quantidade de calcário correspondente e elevado o conteúdo de água próximo à capacidade de campo, utilizando água destilada. Para correção da acidez, foi utilizado calcário dolomítico com 89% de PRNT e 28% e 20% de óxido de cálcio (Ca) e óxido de magnésio (Mg), respectivamente. Após 20 dias os solos foram secados em estufa a 55° C e determinou-se o pH em água. A necessidade real de calcário de cada solo foi determinada através da relação entre as doses de calcário utilizadas e os valores de pH em água. Com base nos resultados, realizou-se a correção de cada solo para valor de pH 6,0, através de incubação similar à utilizada no processo de calibração. Os valores de pH em água, pH TSM e H+Al, tanto do solo natural como o corrigido com calcário, assim como os valores de necessidade de calcário estimados e reais, constam na tabela 14 para os solos do RS, e na tabela 15 para os solos de SC.

Tabela 14 - Valores de pH H₂O e H+Al naturais dos solos e as necessidades de calagem (NC) estimadas pelo H+Al e as obtidas por incubação, nos solos coletados nas camadas 0-10 e 10-20 cm, no estado do RS.

Id	pH H ₂ O ⁽¹⁾	H+Al ⁽¹⁾	NC ⁽²⁾	NC ⁽³⁾	pH H ₂ O ⁽⁴⁾	H+Al ⁽⁴⁾
	1:1	cmol _c dm ⁻³	Mg ha ⁻¹		1:1	cmol _c dm ⁻³
Camada de 0-10 cm						
RS1-LB	4,4	30,0	21,0	24,8	6,2	3,0
RS2-LV	5,2	8,3	6,8	8,1	5,8	3,2
RS3-LV	4,4	13,7	9,9	12,5	6,2	2,3
RS4-LV	6,2	4,2	-	-	6,2	3,5
RS5-LV	5,9	3,4	-	-	6,0	3,4
RS6-LV	5,8	4,0	-	-	5,9	3,9
RS7-LV	4,5	5,7	4,8	6,6	6,2	1,9
RS8-CX	6,5	2,2	-	-	6,6	2,2
RS9-LV	5,5	3,5	2,2	3,0	6,2	3,0
RS10-CX	5,6	3,4	2,2	2,4	6,2	3,4
RS11-PBAC	4,8	4,0	2,7	2,0	6,1	1,9
RS12-TX	5,0	7,6	6,1	6,0	6,2	3,2
RS13-FT	4,9	3,1	1,8	0,5	5,9	2,1
RS14-PV	5,1	2,2	0,8	0,3	6,0	1,3
RS15-PV	4,8	3,0	1,8	1,3	5,9	1,8

RS16-TX	5,0	3,4	2,2	2,6	6,2	1,8
RS17-RL	5,2	4,7	3,7	3,5	5,9	2,9
RS18-LB	4,9	15,6	10,7	14,2	6,2	5,0
RS19-CH	4,8	10,2	7,5	8,6	6,2	3,4
RS20-PV	5,9	2,5	-	-	5,9	2,5
Camada 10-20 cm						
RS1-LB	4,4	30,4	21,0	18,0	6,2	3,5
RS2-LV	5,0	10,6	8,3	11,2	6,2	3,0
RS3-LV	4,8	17,3	11,9	10,4	6,2	2,4
RS4-LV	5,6	5,7	3,2	2,4	6,2	3,1
RS5-LV	5,4	5,0	3,7	3,2	6,2	3,5
RS6-LV	5,8	4,0	-	-	5,9	4,1
RS7-LV	4,6	7,5	6,1	6,0	6,2	1,6
RS8-CX	6,4	2,2	-	-	6,3	2,4
RS9-LV	5,4	3,1	1,8	2,6	6,2	2,8
RS10-CX	5,6	4,3	3,2	5,0	6,2	3,2
RS11-PBAC	4,8	6,1	4,8	2,2	6,0	2,0
RS12-TX	5,2	9,4	7,5	5,6	6,0	3,7
RS13-FT	5,1	3,6	2,2	0,6	5,9	1,9
RS14-PV	5,0	2,0	0,5	0,4	6,1	1,4
RS15-PV	4,8	3,0	1,8	1,4	6,1	1,5
RS16-TX	5,0	3,0	1,8	1,7	6,2	1,6
RS17-RL	5,1	4,6	3,7	3,0	5,9	3,2
RS18-LB	4,8	16,9	11,9	15,6	6,2	3,6
RS19-CH	4,9	11,8	9,1	10,6	6,2	2,8
RS20-PV	5,8	2,9	-	-	5,8	2,9

(¹) Valores do solo natural, sem correção da acidez. (²) Necessidade de calcário determinada através dos valores de H+Al, utilizando equação proposta pela CQFS – RS/SC (2016) ($H+Al, \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3} = e^{(10,665-1,1483SMP)/10}$). (³) Necessidade de calcário para elevação do valor de pH em água a 6,0, determinado através de incubação com doses de calcário. (⁴) Valores obtidos após correção do pH para valor 6,0.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Tabela 15 - Valores de pH H₂O e H+Al naturais dos solos e as necessidades de calagem (NC) estimadas pelo H+Al e as obtidas por incubação, nos solos coletados nas camadas 0-10 e 10-20 cm, no estado de SC.

Id	pH H ₂ O ⁽¹⁾	H+Al ⁽¹⁾	NC ⁽²⁾	NC ⁽³⁾	pH H ₂ O ⁽⁴⁾	H+Al ⁽⁴⁾
	1:1	cmol _c dm ⁻³	Mg ha ⁻¹		1:1	cmol _c dm ⁻³
Camada de 0-10 cm						
SC1-PVA	4,5	8,1	6,1	7,5	6,2	2,3
SC2-PVA	4,7	23,6	17,3	15,0	6,1	2,3
SC3-PV	4,8	13,6	9,9	12,1	6,2	2,3
SC4-PA	5,5	6,1	4,8	5,4	6,1	3,5
SC5-CX	4,6	11,2	8,3	8,9	6,2	2,8
SC6-CH	4,7	29,3	21,0	22,1	6,2	2,8
SC7-PVA	4,7	8,5	6,8	6,5	6,1	2,8
SC8-PVA	4,1	22,5	15,1	21,5	6,1	2,8
SC9-CH	4,5	28,0	21,0	27,3	5,8	2,9
SC10-NV	4,0	34,5	21,0	28,5	6,1	2,3
SC11-NB	4,9	19,0	13,3	23,3	6,2	2,8
SC12-NB	5,1	10,9	8,3	14,7	6,1	2,8
SC13-NB	4,3	22,8	15,1	20,0	6,1	2,8
SC14-LB	4,6	30,0	21,0	25,2	6,1	2,7
SC15-LV	5,4	7,8	6,1	3,7	6,1	2,8
SC16 - LV	4,7	9,6	7,5	13,7	6,1	2,7
SC17-CH	5,1	9,4	7,5	11,8	6,1	2,8
SC18-LB	4,6	17,1	11,9	13,9	6,1	2,8
SC19-CH	4,7	9,9	7,5	6,0	6,1	2,8
SC20-LV	5,1	7,0	5,4	10,1	6,2	2,7
SC21-CX	4,4	21,8	15,1	22,5	5,9	2,5

	Camada 10-20 cm					
SC1-PVA	4,4	7,0	5,4	6,9	6,2	2,2
SC2-PVA	4,4	33,7	21,0	18,0	5,9	2,3
SC3-PV	4,4	17,7	11,9	18,6	6,3	2,2
SC4-PA	4,7	13,9	9,9	6,8	6,1	2,7
SC5-CX	4,2	28,3	21,0	22,3	6,2	2,8
SC6-CH	4,5	32,5	21,0	23,0	6,2	2,7
SC7-PVA	4,8	7,9	6,1	8,2	6,2	2,7
SC8-PVA	4,1	26,8	21,0	25,2	6,2	2,7
SC9-CH	4,5	33,3	21,0	27,3	6,1	2,8
SC10-NV	3,9	40,0	21,0	28,5	6,2	2,7
SC11-NB	4,9	25,9	17,3	23,3	6,2	2,8
SC12-NB	5,1	22,3	15,1	20,2	6,0	2,8
SC13-NB	4,8	20,8	15,1	16,7	6,2	2,7
SC14-LB	4,4	34,9	21,0	27,3	6,1	2,8
SC15-LV	5,3	6,2	4,8	7,1	6,2	2,8
SC16 - LV	4,8	9,9	7,5	15,8	6,1	2,7
SC17-CH	5,0	14,9	10,7	15,5	6,2	2,8
SC18-LB	4,5	25,6	17,3	22,5	6,1	2,7
SC19-CH	4,4	13,1	9,9	9,3	6,2	2,7
SC20-LV	5,2	8,9	6,8	15,8	6,2	2,7
SC21-CX	4,2	52,1	21,0	27,3	6,1	2,6

⁽¹⁾ Valores do solo natural, sem correção da acidez. ⁽²⁾ Necessidade de calcário determinada através dos valores de H+Al, utilizando equação proposta pela CQFS – RS/SC (2016) ($H+Al, \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3} = e^{(10,665-1,1483SMP)/10}$). ⁽³⁾ Necessidade de calcário para elevação do valor de pH em água a 6,0, determinado através de incubação com doses de calcário. ⁽⁴⁾ Valores obtidos após correção do pH para valor 6,0.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A determinação do conteúdo de areia, silte e argila foi realizada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2017) (Tabela 16). Agrupando os solos de acordo com o seu conteúdo de argila, foram coletadas 6 amostras com 0-20% de argila, 6 amostras com 21-40% de argila, 3 amostras com 41-60% de argila e 5 amostras com mais de 60% no RS. Em SC foram coletadas 2 amostras com 0-20% de argila, 9 amostras com 21-40% de argila, 5 amostras com 41-60% de argila e 5 amostras com mais de 60% de argila. Assim, considerando todo o conjunto de solos, foram coletadas 8 amostras com 0-20% de argila, 15 amostras com 21-40% de argila, 8 amostras com 41-60% de argila e 10 amostras com mais de 60% de argila.

Tabela 16 - Conteúdos de argila, silte e areia, determinados pelo método da pipeta, dos solos coletados nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, nos estados do estado do RS e de SC.

Id	%			%		
	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila
	.....Camada 0-10 cm.....			.....Camada 10-20 cm.....		
RS1-LB	4,1	30,4	65,5	2,0	30,2	67,8
RS2-LV	2,4	30,6	67,0	1,4	26,3	72,3
RS3-LV	46,2	17,9	35,9	45,0	20,0	35,0
RS4-LV	24,2	29,4	46,4	21,7	27,7	50,6
RS5-LV	1,8	35,1	63,1	0,5	30,1	69,4
RS6-LV	2,5	36,1	61,4	1,4	36,6	62,0
RS7-LV	69,4	9,5	21,1	67,9	8,9	23,2
RS8-CX	17,7	62,0	20,3	4,5	71,6	23,9
RS9-LV	1,2	27,6	71,2	0,4	27,8	71,8
RS10-CX	17,1	41,9	41,0	1,7	53,5	44,8
RS11-PBAC	81,6	6,2	12,2	80,2	6,8	13,0
RS12-TX	57,6	28,6	13,8	55,7	33,2	11,1

RS13-FT	74,5	13,4	12,1	73,3	14,7	12,0
RS14-PV	84,2	6,0	9,8	84,0	6,5	9,5
RS15-PV	81,0	7,0	12,0	82,3	5,3	12,4
RS16-TX	73,4	13,7	12,9	73,8	12,8	13,4
RS17-RL	32,6	43,4	24,5	29,9	45,0	25,1
RS18-LB	10,2	41,9	47,9	6,2	39,3	54,5
RS19-CH	8,8	58,0	33,2	7,2	56,8	36,0
RS20-PV	15,2	46,3	38,5	13,2	47,1	39,7
SC1-PVA	62,5	18,8	18,7	62,0	19,0	19,0
SC2-PVA	41,4	27,2	31,4	36,5	31,5	32,0
SC3-PV	51,1	22,6	26,3	45,0	27,7	27,3
SC4-PA	45,3	30,3	24,4	48,4	26,8	24,8
SC5-CX	26,6	46,2	27,2	29,0	42,1	28,9
SC6-CH	20,3	46,2	33,5	19,0	45,8	35,2
SC7-PVA	27,2	38,1	34,7	37,4	24,3	38,3
SC8-PVA	31,2	34,3	34,5	33,1	32,3	34,6
SC9-CH	33,5	33,5	33,0	25,3	38,7	36,0
SC10-NV	26,5	30,4	43,1	25,6	30,0	44,4
SC11-NB	10,1	39,6	50,3	4,3	43,5	52,2
SC12-NB	15,2	33,0	51,8	12,1	32,0	55,9
SC13-NB	10,8	30,7	58,5	8,9	31,9	59,2
SC14-LB	4,4	28,7	66,9	3,3	27,6	69,1
SC15-LV	2,0	30,9	67,0	0,8	28,3	70,9
SC16 - LV	2,7	26,7	70,6	1,2	23,3	75,5
SC17-CH	21,4	34,6	44,0	25,3	32,2	42,5
SC18-LB	15,8	24,0	60,2	12,4	24,4	63,2
SC19-CH	67,9	14,3	17,8	66,0	15,7	18,3
SC20-LV	1,8	29,7	68,5	0,9	26,4	72,7
SC21-CX	35,6	36,3	28,1	35,0	30,6	34,4

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os teores trocáveis de Ca, Mg e Al foram extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹, e determinados por espectrofotometria de absorção atômica (aparelho AAnalyst 200, PERKINELMER); os valores disponíveis de P e K foram extraídos com a solução de Mehlich 1 (0,0125 mol L⁻¹ de H₂SO₄ e 0,050 mol L⁻¹ de HCl) e a determinação da concentração de P foi realizada pelo método da quantificação do complexo fosfomolibdato em espectrofotômetro de absorção molecular (UV-1800, SHIMADZU), com leitura em comprimento de onda de 882 nm, seguindo metodologia descrita por Murphy & Riley (1962), enquanto o K foi determinado por fotometria de chama (aparelho DM-62, DIGIMED). O conteúdo de carbono orgânico total (COT) foi determinado por solução sulfocrômica determinada por espectrofotometria a 645 nm (UV-1800, SHIMADZU). Os processos de extração dos elementos acima citados foram baseados em metodologias descritas em Tedesco et al. (1995). Com base nos resultados encontrados também foram determinados os valores de CTC pH 7.

O P remanescente (P-rem) foi determinado através da adição de 1 g de solo em tubos falcon contendo 10 mL de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ e concentração de P de 60 mg L⁻¹. A solução de P foi preparada utilizando fosfato de potássio monohidratado (KH₂PO₄ p.a.). Após agitação em agitador do tipo “end over end” por 1 hora, as amostras foram centrifugadas por 15 minutos a 3000 rpm, com posterior determinação pelo método da quantificação do complexo

fosfomolibdato em espectrofotômetro de absorção molecular, com leitura em comprimento de onda de 882 nm (MURPHY; RILEY, 1962).

A determinação da capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) foi realizada através da pesagem de 0,5 g de solo em tubos falcon de 15 mL, e equilibrados com 10 mL de solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} contendo oito concentrações de P, as quais foram determinadas de acordo com o valor de P-rem. Devido à alta variação dos valores de P-rem entre os solos, foram criadas três classes de valores de P-rem e, para cada uma delas, utilizada um conjunto de doses do nutriente, sendo assim dispostas: solos com P-rem de 0-15 mg L^{-1} : 0, 4, 8, 16, 32, 64, 80, 128 e 160 mg L^{-1} , que correspondem a 0, 80, 160, 320, 640, 1280, 1600, 2560 e 3200 mg kg^{-1} ; solos com P-rem de 15,1 a 30 mg L^{-1} : 0, 2, 4, 8, 16, 32, 40, 64 e 80 mg L^{-1} , que correspondem a 0, 40, 80, 160, 320, 640, 800, 1280 e 1600 mg kg^{-1} ; e solos com P-rem maior do que 30 mg L^{-1} : 0, 1, 2, 4, 8, 16, 20, 32 e 40 mg L^{-1} , que correspondem a 0, 20, 40, 80, 160, 320, 400, 640 e 800 mg kg^{-1} . Utilizou-se como fonte de P o reagente KH_2PO_4 p.a. As amostras foram agitadas por 16 h em agitador tipo “end-over-end” a 30 rpm. Após a agitação, separou-se o solo da solução por meio da centrifugação a 3000 rpm por 15 minutos, procedendo-se as determinações de P no sobrenadante (MURPHY; RILEY, 1962). O fósforo sorvido foi obtido pela diferença entre a quantidade adicionada e a recuperada na solução de equilíbrio. Os dados de P-sorvido e P-solução foram ajustados à equação de Langmuir: $P \text{ sorvido} = k \cdot \text{CMAP} \cdot C / 1 + k \cdot C$, em que k = constante relacionada com a energia de adsorção, CMAP = capacidade máxima de adsorção de P e C = concentração de P na solução. Nas tabelas 17 e 18 são apresentados os atributos químicos dos solos do RS e SC, respectivamente.

Tabela 17 - Valores de Ca e Mg trocáveis, K disponível, CTC pH 7, COT, P disponível, Prem, CMAP e *k* nas camadas de 0-10 e 10-20 cm dos 20 solos coletados no estado do RS.

Id	Ca	Mg	CTC _{pH7}	COT	K	P	Prem	CMAP	<i>k</i>
	.....cmolc dm ⁻³			g kg ⁻¹	.....mg dm ⁻³		mg L ⁻¹	mg kg ⁻¹	-
Camada 10-20 cm									
RS1-LB	6,6	5,9	15,6	22,6	72,0	3,3	9,0	2313,1	0,11
RS2-LV	7,1	5,2	15,8	17,4	114,0	5,4	14,0	1790,2	0,10
RS3-LV	5,3	4,3	12,0	9,5	50,0	2,7	19,1	885,1	0,22
RS4-LV	4,2	4,6	12,5	20,0	116,0	13,2	20,7	912,1	0,14
RS5-LV	4,1	3,7	12,2	12,3	382,0	5,4	19,8	1228,1	0,09
RS6-LV	4,4	3,4	12,1	12,2	150,0	2,0	13,3	1790,8	0,06
RS7-LV	2,4	2,9	7,5	5,6	102,0	7,8	36,0	346,7	0,33
RS8-CX	3,4	3,1	9,2	24,0	180,0	9,9	30,7	473,7	0,33
RS9-LV	4,1	3,5	10,9	7,9	98,0	7,0	16,9	1267,2	0,11
RS10-CX	4,4	3,5	11,5	10,2	100,0	5,4	7,9	1599,2	0,16
RS11-PBAC	2,0	2,1	6,3	4,3	114,0	7,1	42,2	278,1	0,19
RS12-TX	1,3	3,1	7,9	9,8	66,0	13,3	32,9	696,2	0,34
RS13-FT	1,0	1,2	4,4	6,4	70,0	7,8	44,8	249,4	0,11
RS14-PV	0,6	0,9	3,0	6,0	52,0	9,6	46,8	190,8	0,08
RS15-PV	1,5	1,7	5,2	4,5	52,0	9,1	45,5	302,5	0,06
RS16-TX	3,3	2,4	8,0	7,1	188,0	15,0	49,1	275,4	0,10
RS17-RL	4,0	3,6	11,2	20,7	272,0	10,4	34,4	496,4	0,21
RS18-LB	4,5	4,9	14,7	16,3	140,0	6,6	8,6	2360,4	0,12
RS19-CH	4,4	4,3	12,5	15,5	140,0	5,0	18,9	1313,6	0,11
RS20-PV	1,3	1,5	5,8	3,7	32,0	50,0	33,7	411,8	0,14
Camada 10-20 cm									
RS1-LB	5,9	5,9	15,4	19,4	38,0	1,0	5,3	2259,7	0,24
RS2-LV	6,5	5,2	14,8	13,7	28,0	1,9	11,4	2023,4	0,11
RS3-LV	3,7	4,0	10,1	7,4	24,0	1,4	15,7	962,5	0,33
RS4-LV	3,8	4,0	11,0	10,9	36,0	5,3	19,3	1125,1	0,11
RS5-LV	4,2	3,7	12,0	9,1	274,0	2,2	16,8	1235,1	0,14
RS6-LV	2,4	2,2	8,8	7,8	46,0	0,8	11,8	1632,5	0,08
RS7-LV	2,2	2,7	6,7	4,2	60,0	3,7	35,0	351,8	0,37
RS8-CX	3,9	4,0	10,5	10,8	84,0	3,3	20,4	786,6	0,25
RS9-LV	3,5	3,2	9,6	4,3	28,0	5,7	13,8	1606,4	0,06
RS10-CX	4,6	3,2	11,2	6,2	40,0	2,2	11,5	1633,6	0,24
RS11-PBAC	1,6	1,4	5,2	3,7	58,0	3,4	40,1	283,0	0,31
RS12-TX	4,3	2,9	11,0	8,4	44,0	7,2	28,8	749,9	0,42
RS13-FT	0,9	1,1	4,0	1,8	34,0	3,6	42,6	217,0	0,23
RS14-PV	0,6	0,8	2,8	0,5	30,0	4,8	46,6	197,9	0,09
RS15-PV	1,3	1,5	4,4	2,0	28,0	5,0	44,6	301,8	0,06
RS16-TX	2,8	2,2	6,9	3,6	126,0	8,3	43,4	410,8	0,05
RS17-RL	3,4	3,1	10,2	17,1	208,0	6,2	28,3	763,8	0,17
RS18-LB	4,4	5,0	13,1	11,4	52,0	2,3	10,2	2580,1	0,08
RS19-CH	4,1	4,2	11,3	8,1	60,0	2,1	12,8	1844,1	0,11
RS20-PV	3,8	1,7	9,6	1,5	16,0	20,3	23,6	702,4	0,21

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Tabela 18 - Valores de Ca e Mg trocáveis, K disponível, CTC pH 7, COT, P disponível, Prem, CMAP e *k* nas camadas de 0-10 e 10-20 cm dos 20 solos coletados no estado de SC.

Id	Ca	Mg	CTC _{pH7}	COT	K	P	Prem	CMAP	<i>k</i>
	.....cmolc dm ⁻³			g kg ⁻¹	.....mg dm ⁻³		mg L ⁻¹	mg kg ⁻¹	-
camada 0-10 cm									
SC1-PVA	2,3	2,4	7,1	11,1	66,0	6,5	27,4	389,6	0,5
SC2-PVA	3,8	3,8	10,3	12,5	126,0	5,7	24,7	570,7	0,8
SC3-PV	3,8	3,7	10,2	13,3	154,0	1,4	13,7	1258,4	0,3
SC4-PA	3,6	1,8	9,0	12,8	52,0	3,7	25,1	443,2	0,1
SC5-CX	3,5	4,1	10,8	16,6	178,0	19,8	18,3	691,1	0,7

SC6-CH	5,0	4,5	12,5	17,4	90,0	2,9	9,5	1129,8	0,6
SC7-PVA	3,8	2,4	9,1	7,8	38,0	19,4	24,8	456,2	0,7
SC8-PVA	3,9	4,1	10,9	28,3	74,0	4,5	17,7	678,8	1,8
SC9-CH	6,0	5,6	14,6	27,7	24,0	4,7	5,7	1689,5	0,4
SC10-NV	6,0	5,7	14,5	36,9	216,0	9,7	5,2	1915,6	0,5
SC11-NB	5,5	4,8	13,2	26,1	66,0	1,0	3,8	2469,4	0,4
SC12-NB	5,6	4,7	13,3	29,6	72,0	1,9	9,5	1877,0	0,4
SC13-NB	5,9	5,4	14,3	21,4	50,0	2,3	3,7	2349,8	0,3
SC14-LB	4,1	3,6	10,6	15,6	42,0	3,2	9,8	1475,8	0,3
SC15-LV	5,9	3,6	12,7	22,9	168,0	6,7	10,1	1693,5	0,2
SC16 - LV	4,1	3,8	11,0	20,0	140,0	24,3	11,5	1576,9	0,2
SC17-CH	3,8	3,7	10,5	23,3	66,0	1,6	9,4	1621,0	0,2
SC18-LB	4,9	4,7	12,6	28,4	56,0	2,9	6,0	1810,1	0,9
SC19-CH	1,8	1,9	6,6	15,9	42,0	8,8	25,8	895,5	0,1
SC20-LV	4,9	3,5	11,3	15,4	80,0	5,7	11,3	1575,8	0,1
SC21-CX	5,2	4,5	12,6	27,5	162,0	11,6	12,9	1336,0	0,3
camada 10-20 cm									
SC1-PVA	2,2	2,3	6,8	7,8	28,0	3,0	26,4	362,5	0,6
SC2-PVA	4,2	4,0	10,7	5,5	80,0	2,5	25,0	671,2	1,0
SC3-PV	4,4	4,1	10,8	7,6	58,0	0,5	7,5	1465,7	0,4
SC4-PA	2,9	1,6	7,3	8,8	20,0	2,2	27,7	366,5	0,9
SC5-CX	4,8	4,7	12,5	9,3	100,0	4,0	16,4	737,4	0,9
SC6-CH	5,7	4,9	13,4	14,3	44,0	1,4	7,6	1471,2	0,3
SC7-PVA	3,0	2,2	8,0	4,0	18,0	3,1	19,4	578,3	1,0
SC8-PVA	3,9	4,0	10,7	21,3	50,0	2,8	18,1	663,5	0,9
SC9-CH	5,5	5,2	13,6	24,3	68,0	2,0	3,4	2001,9	0,6
SC10-NV	6,4	6,1	15,5	27,5	124,0	3,0	4,5	1875,7	0,5
SC11-NB	6,0	5,1	13,9	18,0	36,0	0,7	3,0	2638,6	0,4
SC12-NB	4,3	3,9	11,1	22,0	36,0	0,9	6,0	2266,9	0,2
SC13-NB	4,7	4,4	11,9	17,0	24,0	1,0	3,1	2377,8	0,5
SC14-LB	3,7	3,3	9,7	13,5	24,0	1,5	7,6	1561,3	0,4
SC15-LV	5,6	4,4	13,0	15,4	64,0	3,2	6,6	1885,5	0,3
SC16 - LV	3,1	2,9	9,0	9,5	70,0	3,0	4,8	1892,2	0,3
SC17-CH	3,9	3,6	10,4	20,0	36,0	1,1	8,0	1595,2	0,4
SC18-LB	5,1	5,0	12,9	28,6	26,0	1,2	3,7	2358,3	0,4
SC19-CH	2,0	2,1	6,9	10,8	18,0	2,8	24,4	983,6	0,1
SC20-LV	5,3	4,3	12,3	9,0	30,0	2,8	6,7	1569,1	0,3
SC21-CX	6,4	5,6	14,7	11,2	116,0	4,4	12,4	1323,8	0,3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os conteúdos totais de Fe e Al (Fe-Total e Al-Total) foram extraídos por ataque sulfúrico, conforme metodologia proposta por Embrapa (2017), enquanto as quantidades de Fe e Al de baixa cristalinidade (Fe-BC e Al-BC) foram extraídas através de solução de ácido oxálico 0,1 mol L⁻¹ + oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ a pH 3, conforme Schoumans (2009). A determinação das frações de Fe e Al foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica (aparelho AAnalyst 200, PERKINELMER). Com base nos valores analisados, foram estimadas as quantidades de Fe e Al de alta cristalinidade (Fe-AC e Al-AC), pela diferença entre o conteúdo total e a fração extraída pela solução ácida de oxalato de amônio. Estas frações de Fe e Al foram realizadas apenas para os solos do RS e constam no Apêndice 5.

6.1.3 Determinação da capacidade tampão de P em solos do RS e SC

O experimento foi conduzido nas dependências do laboratório de Química e Fertilidade do Solo do CAV/UEDESC, entre dezembro de 2018 – fevereiro de 2019, para os solos do RS, e entre janeiro de 2020 – março de 2020, para os solos de SC. O experimento foi instalado e conduzido sob delineamento inteiramente casualizados (DIC). Para cada solo foram testadas 12 doses de P_2O_5 , com três repetições. Uma solução concentrada de P foi preparada a partir do fertilizante superfosfato triplo (SFT). Para preparo da solução, cerca de 40 g de adubo finamente moído foram adicionados em 0,6 L de água destilada e a mistura foi agitada por cerca de 24 horas; posteriormente, a solução foi separada do material sólido em filtro qualitativo e foi realizada a determinação da concentração da solução. A concentração final da solução foi de 8244,62 mg L⁻¹, para a utilizado nos solos do RS, e 8314,93, mg L⁻¹ para a utilizada nos solos de SC.

As doses de P usadas para cada solo foram definidas com base nos valores de CMAP. Inicialmente os solos foram separados em 3 grupos: solos com até 500 mg kg⁻¹ de CMAP (grupo 1), solos com CMAP entre 500 - 1250 (grupo 2) e solos com CMAP entre 1250 - 2500 mg kg⁻¹ (grupo 3). O agrupamento e as doses utilizadas constam na tabela 19.

Tabela 19 - Agrupamento dos solos em função da CMAP e doses de P utilizadas na incubação dos solos coletados no RS e em SC.

Grupos ⁽¹⁾	Solos	Doses ⁽²⁾		Solos	Doses de P		
		P-mg kg ⁻¹			P - mg kg ⁻¹		
1	RS7 e RS11						
			0,0		0,0		0,0
			5,0		5,0		2,5
			10,0		10,0		5,0
			25,0		15,0		7,5
			37,5		20,0		10,0
			50,0	RS13, RS14,	25,0	SC1 e SC4	15,0
			62,5	RS15 e RS16	30,0		20,0
			75,0		37,5		30,
			100,0		50,0		60,0
			125,0		125,0		
			250,0		250,0		
			500,0		500,0		
2	RS3, RS4 e RS12						
			0,0		0,0		0,0
			12,5		12,5		6,2
			25,0		25,0		12,5
			62,5		37,5		18,8
			93,8		50,0		25,0
			125,0	RS5, RS8 e	62,5	SC2, SC5, SC7 SC8 e SC19	37,5
			156,2	RS20	75,0		50,0
			187,5		93,8		75,0
			250,0		125,0		150,0
			312,5		312,5		
			625,0		625,0		
			1250,0		1250,0		
3	RS1 e RS2						
			0,0		0,0		0,0
			25,0		25,0		6,2
			50,0		50,0		12,5
			125,0		75,0	SC3, SC6, SC9 SC10, SC11, SC12, SC13, SC14, SC15, SC16,	25,0
			187,5	RS6, RS 9,	100,0		37,5
			250,0	RS10, RS18 e	125,0		50,0
			312,5	RS19	150,0		62,5
					187,5	125,0	
					250,0	250,0	
			625,0	SC20 e SC21	625,0		
			1250,0		1250,0		
			2500,0		2500,0		

⁽¹⁾ Grupos 1, 2 e 3 representam as doses máximas de 500, 1250 e 2500 mg kg⁻¹ de P, respectivamente, em função dos valores de CMAP dos solos. ⁽²⁾ Doses de P na unidade de mg kg⁻¹ de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As unidades experimentais foram constituídas por amostras de solo de 50 gramas de solo, adicionadas em sacos plásticos. A quantidade de solução de P para atingir a dose desejada foi pesada em balança de precisão e acrescentada ao solo. Após a aplicação da solução de P, a umidade do solo foi elevada para sua capacidade de campo com adição de água destilada, sempre que necessário. As unidades experimentais foram mantidas em incubação por 20 dias, sendo que semanalmente foi realizada a abertura das embalagens para liberação do excesso de CO₂ e reposição de água, quando necessária.

Após o término da incubação, as amostras de solo foram secas em estufa à temperatura de 60 °C e, posteriormente, tamisadas em malha de 2 mm. Posteriormente foi realizada a extração do P disponível com Mehlich 1 e a determinação pelo método da quantificação do complexo fosfomolibdato em espectrofotômetro de absorção molecular, com leitura em comprimento de onda de 882 nm (MURPHY; RILEY, 1962).

As relações entre as 12 doses aplicadas e os valores extraídos por Mehlich 1 ao final da incubação foram realizadas por equações lineares de dois segmentos. Posteriormente, foram selecionadas apenas doses de P que resultaram em valores extraídos de P Mehlich-1 de até duas vezes o NC para cultura de grãos (CQFS – RS/SC, 2016), valor este que representa o valor mais alto da amplitude que contempla solos na classe de disponibilidade “alto”. Com base nesse conjunto de doses, foram geradas equações lineares simples e determinados os valores de CTP, através do inverso do coeficiente angular de cada equação linear ($CTP = 1/\text{coeficiente angular}$). Essa estimativa de tamponamento dos solos foi designada CTP-1.

Os valores de CTP-1 foram correlacionados com os seguintes atributos do solo: P inicial em condição natural, conteúdo de argila, CTC pH 7.0, TOC, P-rem, P-max e altitude do ponto de coleta. Com base nesses atributos, foi gerada uma equação linear múltipla através da opção “Backward stepwise”, com base na variável resposta CTP-1.

Na etapa seguinte, foi realizado um novo desdobramento das doses de P aplicadas, objetivando avaliar a influência da argila e do teor inicial de P sobre a capacidade de tamponamento dos solos. Para cada solo buscou-se criar três novas equações lineares (relação doses x P Mehlich 1 no solo): i) curva primária que deu origem ao CTP-1, ii) eliminação das doses mais baixas da curva “i” até alcançar a faixa de disponibilidade de P imediatamente acima da anterior (primeira dose com teores resultantes no solo na classe “baixo”), e iii) eliminação das doses mais baixas da curva “ii” até alcançar a faixa de disponibilidade de P imediatamente acima da anterior (primeira dose com teores resultantes no solo na classe “médio”). As curvas “i”, “ii” e “iii” objetivaram simular condições em que o solo estivesse classificado em “muito baixo”, “baixo” e “médio”, seguindo o estabelecido pela CQFS – RS/SC (2016). Com base nestas novas equações, foram quantificados os valores de CTP-2.

Posteriormente, foi avaliada a influência do conteúdo de argila e do teor inicial de P na CTP-2, com base nas classes preconizadas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos estados do RS e SC (CQFS, RS/SC, 2016). A partir da separação estatística obtida para estes fatores, foram apresentados valores para recomendação da adubação de correção total.

6.1.4 Recomendação de adubação de correção total com base nos valores de CTP

Os valores tabelados da CTP-2, em função da argila e do teor inicial de P, foram usados para simular uma recomendação de adubação de correção total. Os valores estimados foram comparados à recomendação realizada com base nos valores indicados pela CQFS-RS/SC (2016). Para os valores de CTP-2, a quantidade de adubação de correção (QAC) foi obtida com

base na equação 1, e seguindo metodologia já utilizada na região dos Cerrados (Sousa and Lobato, 2002):

$$QAC (kg ha^{-1} de P_2O_5) = (P final - P inicial) * CTP \quad \text{Equação 1}$$

na qual “QAC” representa a quantidade de fertilizante fosfatado a ser aplicado para adubação de correção total, na camada de 0-20 cm, “P final” e “P inicial” representam os valores desejado/nível crítico da cultura e inicial/natural, respectivamente, e CTP é a capacidade tampão de P do solo.

A comparação entre as doses recomendadas pelos dois métodos foi realizada com um conjunto de 270 amostras de solo. Essas amostras foram obtidas no laboratório de rotina do CAV/UEDESC e compreendem solos com teor extraível de P abaixo do NC para as culturas de grãos (CQFS-RS/SC, 2016).

6.1.5 Análise estatística

Os valores de CTP-1 e CTP-2 obtidos foram submetidos à análise de normalidade, pelo teste de Shapiro-Wilk e, quando necessários, transformados por Box-cox para atender aos pressupostos de normalidade. Posteriormente, foram submetidos à análise de variância (ANOVA). A correlação entre os valores de CTP-1 e atributos do solo foram realizados pelo teste de Pearson ($p < 0.05$). Os valores de CTP-2 obtidos foram comparados pelo teste de médias de Tukey ($p < 0.05$), dentro das quatro classes de argila e das três classes de disponibilidade estabelecidos pela CQFS – RS/SC (2016). A comparação das doses recomendadas pela CQFS – RS/SC (2016) e os valores de CTP, para os 270 solos, foi feita pelo teste t para uma única amostra. As análises foram realizadas com base nos softwares SigmaPlot 12.5 e Sisvar 5.6 (FERREIRA, 2014).

6.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

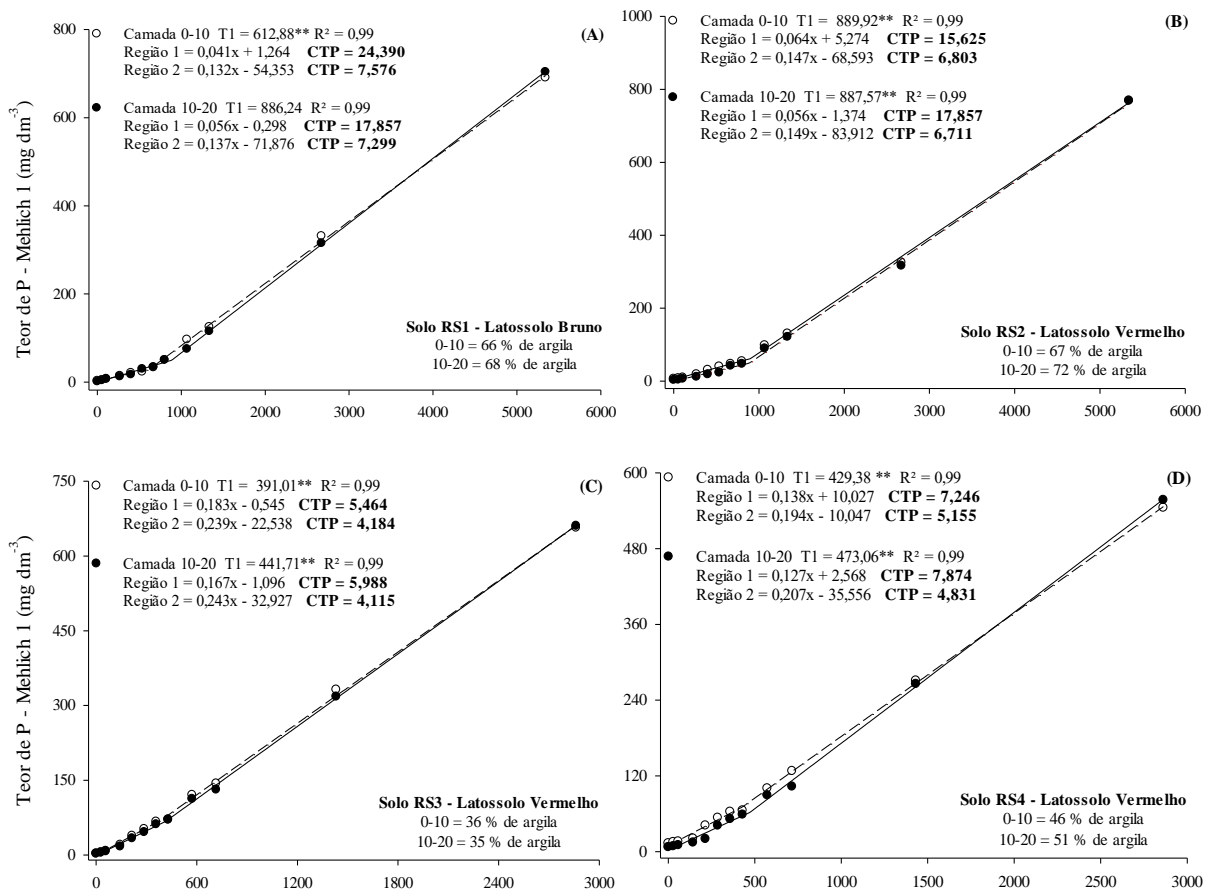
6.2.1 Visualização geral

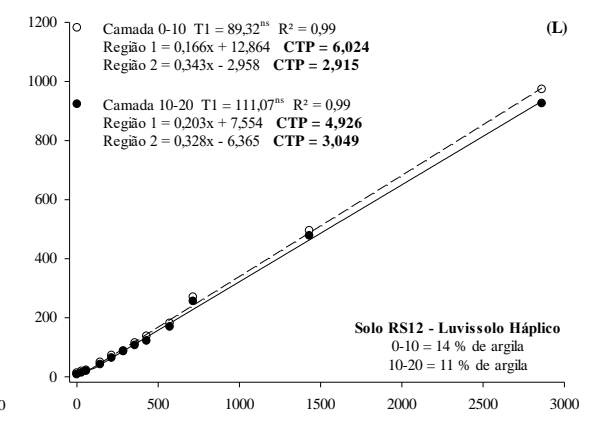
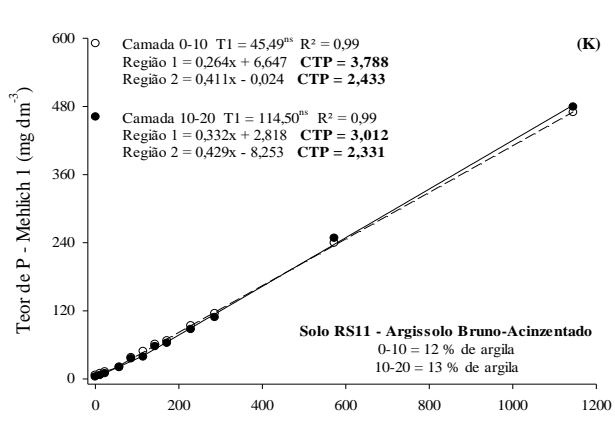
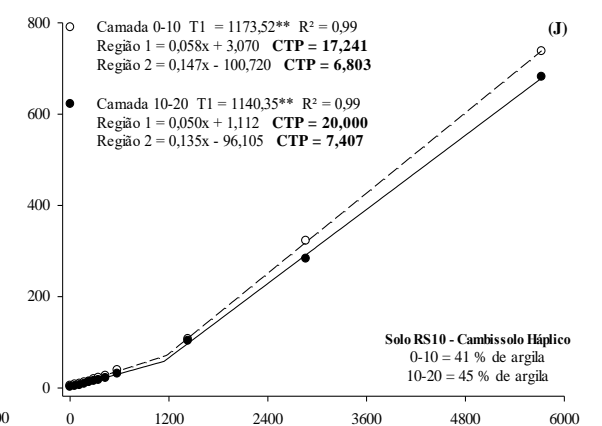
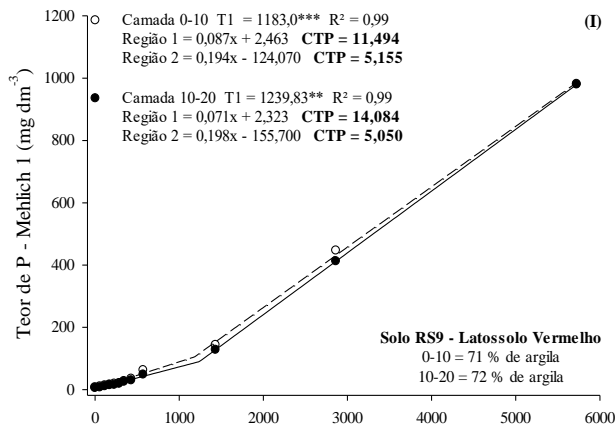
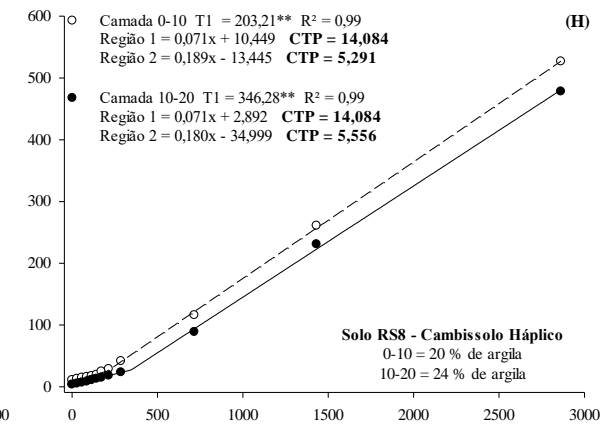
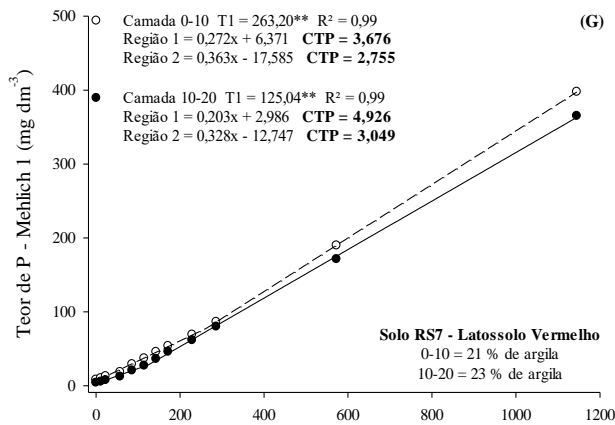
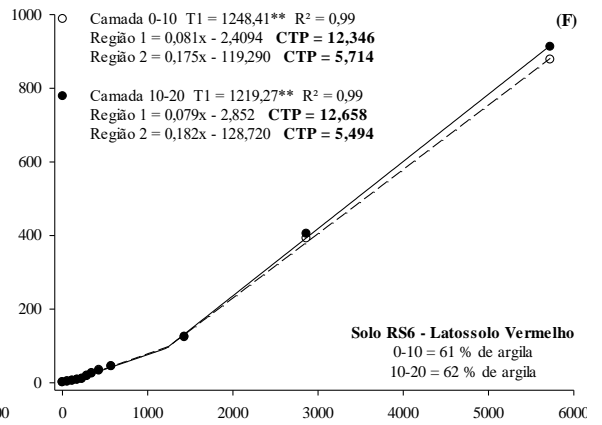
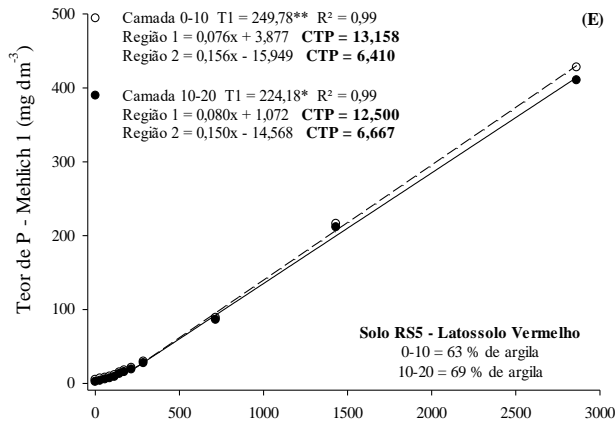
As figuras 12 e 13 apresentam a relação entre as doses de P aplicadas e a disponibilidade do nutriente no solo (P Mehlich 1), após os 20 dias de incubação. Para todos os solos houve aumento do conteúdo extraível em função das doses aplicadas, porém com magnitudes e comportamentos heterogêneos. Para muitos solos, especialmente os mais argilosos, houve alterações significativas ao longo da relação entre as duas variáveis, com significância nas equações lineares de dois segmentos ($p < 0.05$). Para os demais solos, representados

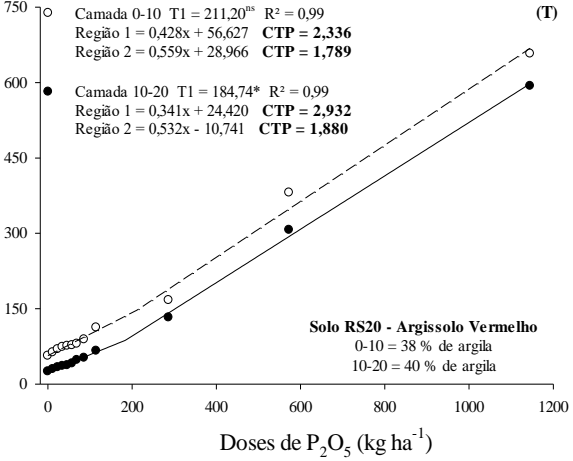
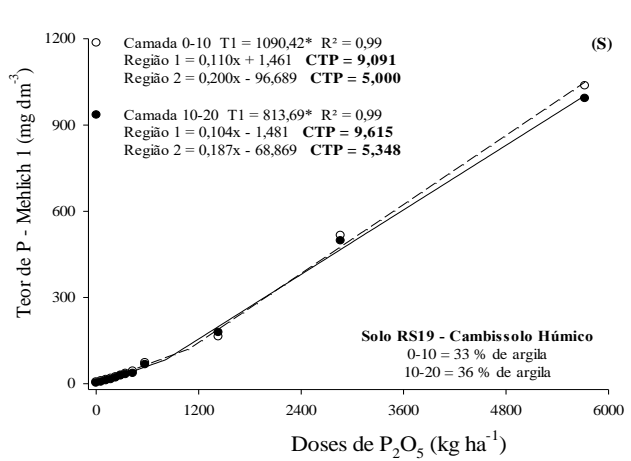
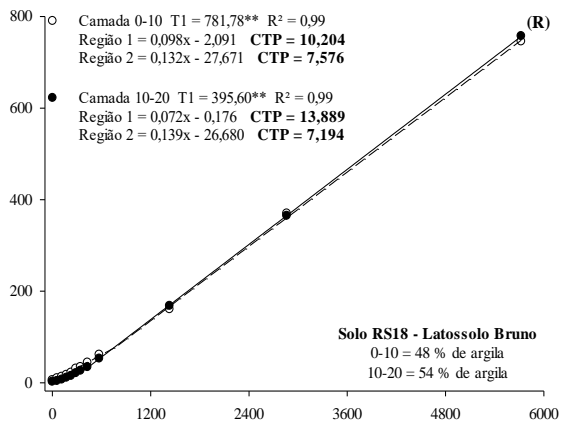
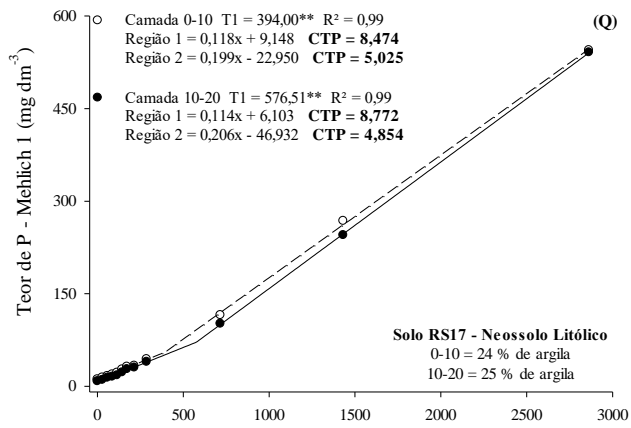
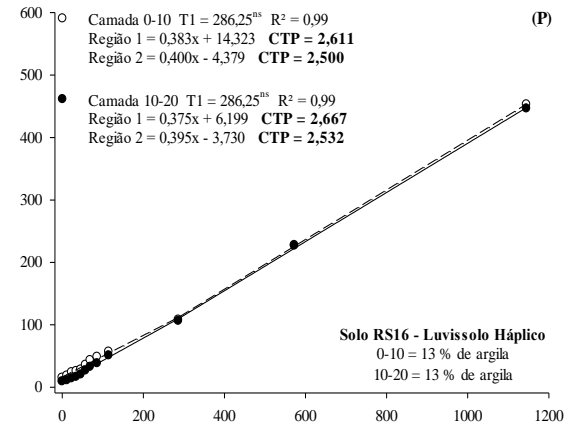
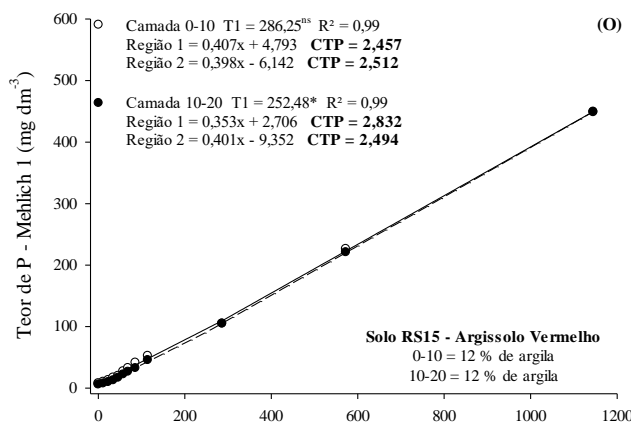
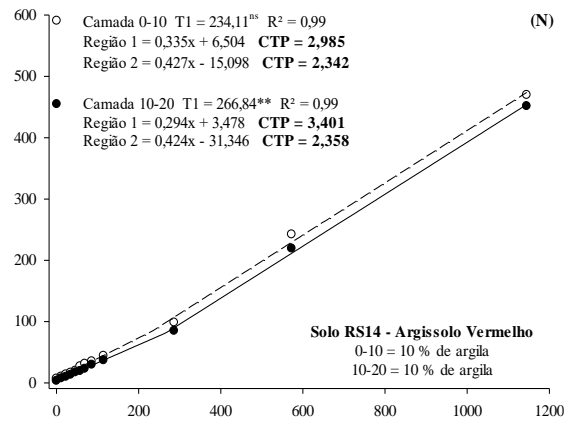
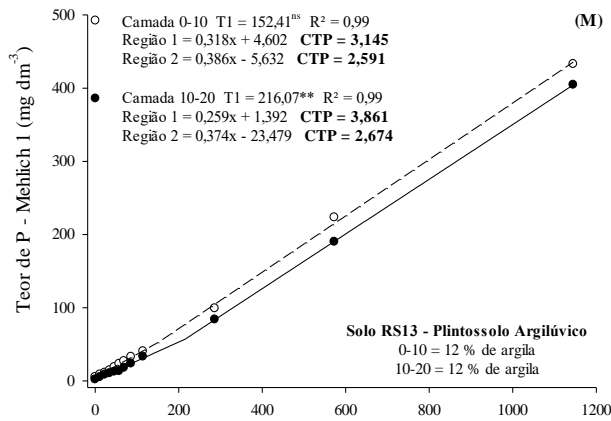
principalmente pelos mais arenosos, uma única equação linear explicou a relação entre as doses aplicadas e os teores extraídos por Mehlich 1.

Nos solos em que foi significativa a separação da relação entre as doses aplicadas e os teores extraídos por Mehlich 1, o ponto de quebra representou a condição com maior alteração no tamponamento. Dentre as duas equações lineares geradas, o coeficiente angular da segunda equação, que considera a faixa de doses a partir do ponto de quebra, foi mais alto, indicando que a necessidade de P para elevar sua disponibilidade reduz. Considerando todo o conjunto de solos em que houve diferenciação em duas retas, as diferenças em termos de tamponamento (variação entre os valores do inverso dos coeficientes angulares) variaram entre 1.1 e 4.3 vezes.

Figura 12 - Teores de P extraídos por Mehlich 1 em função da adição de doses de P, após incubação de 20 dias, para os solos do RS.

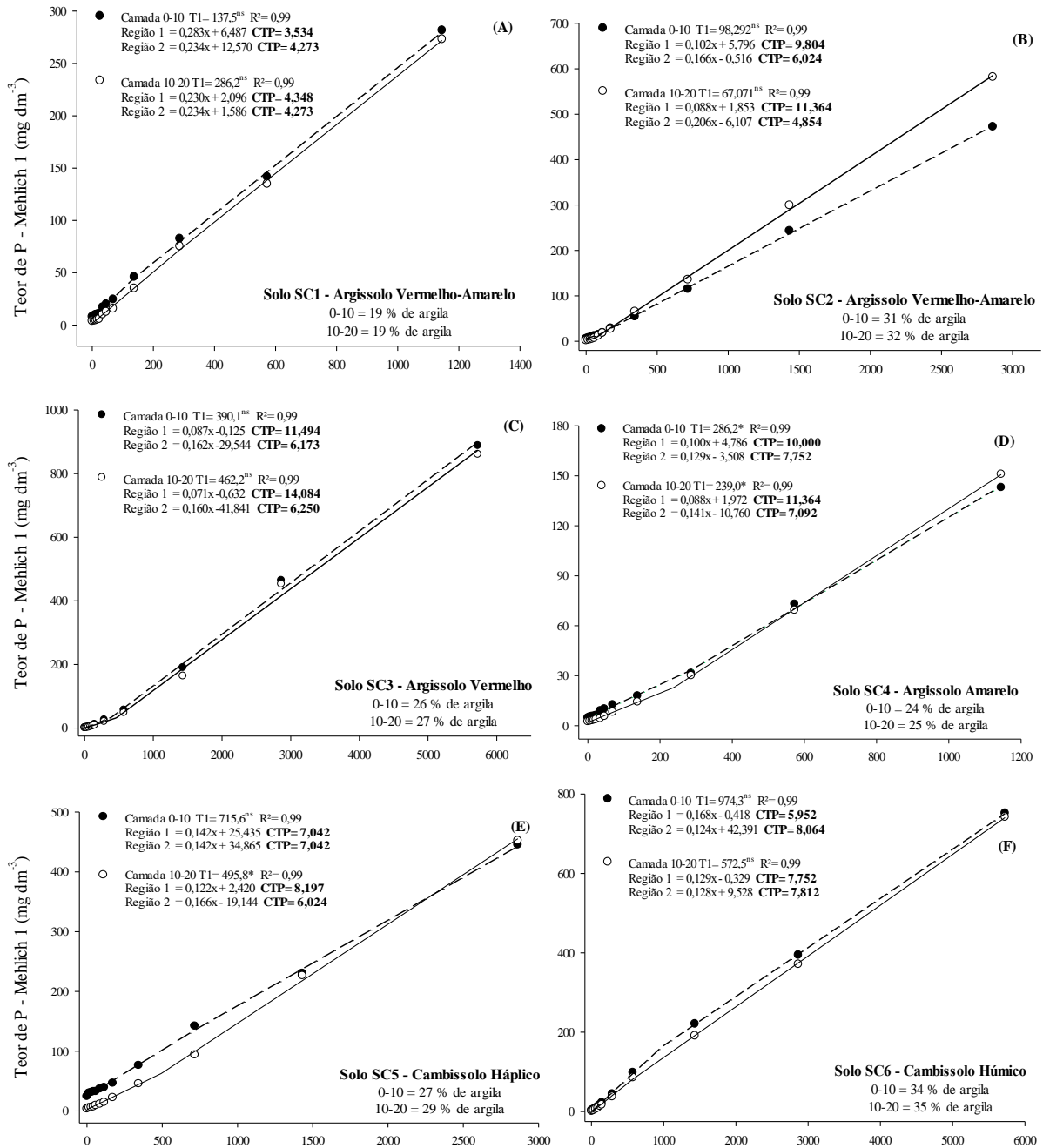


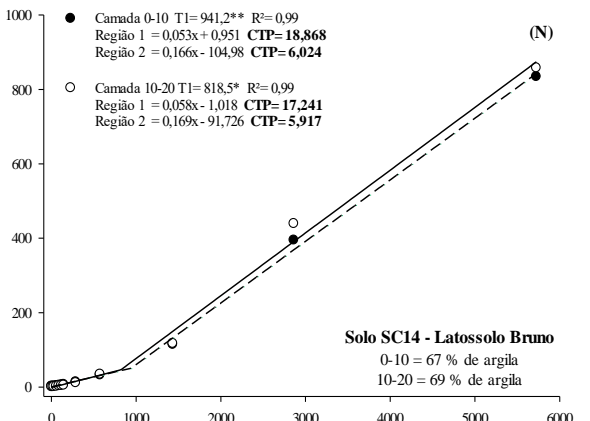
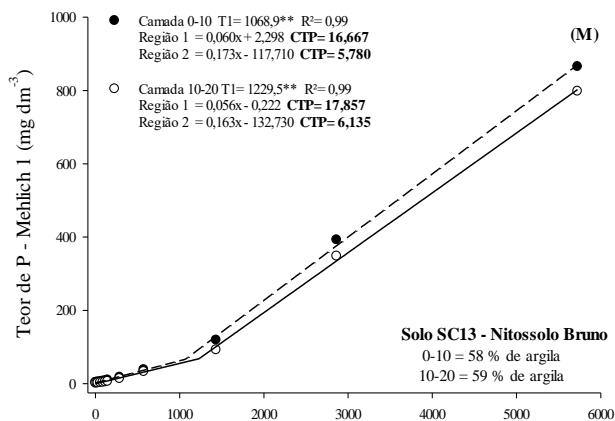
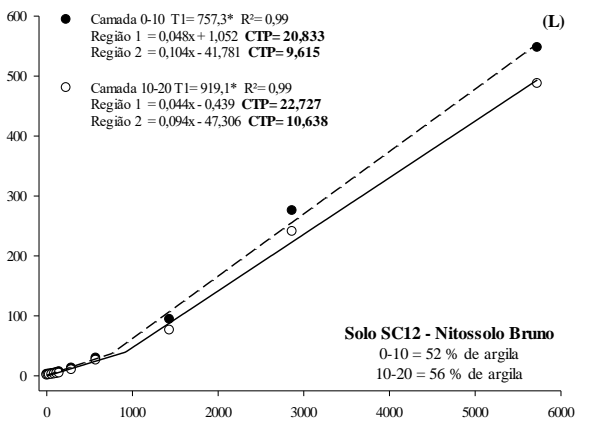
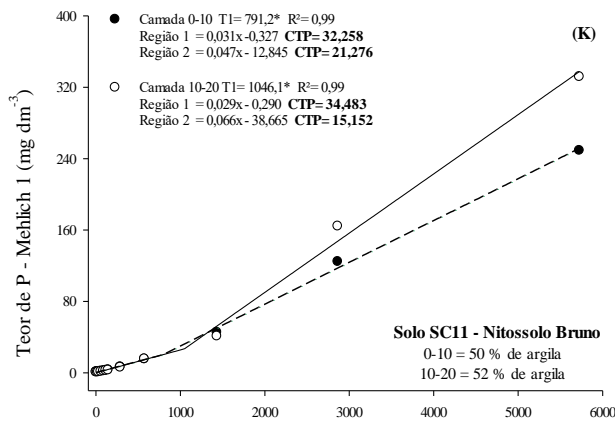
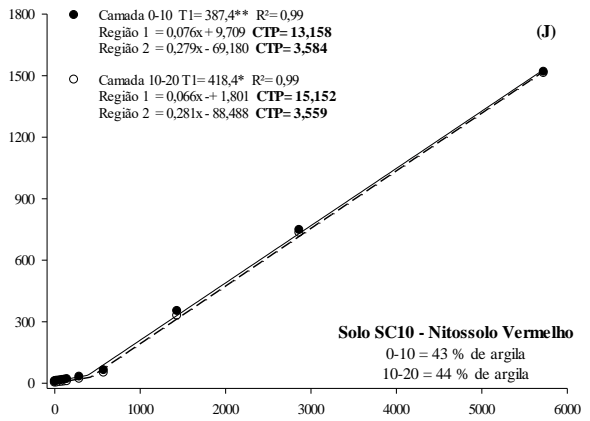
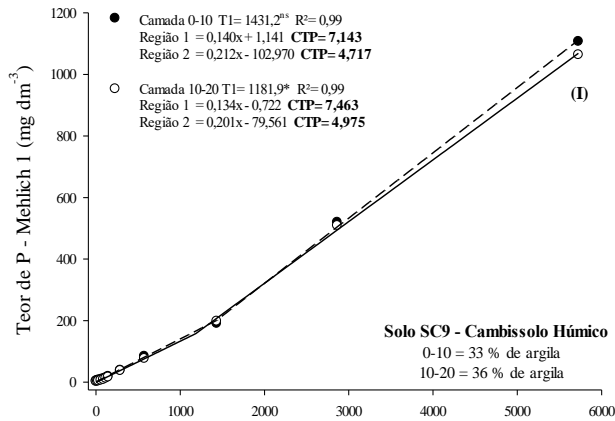
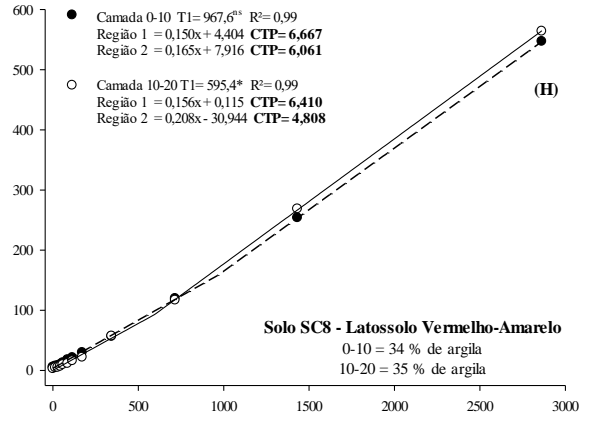
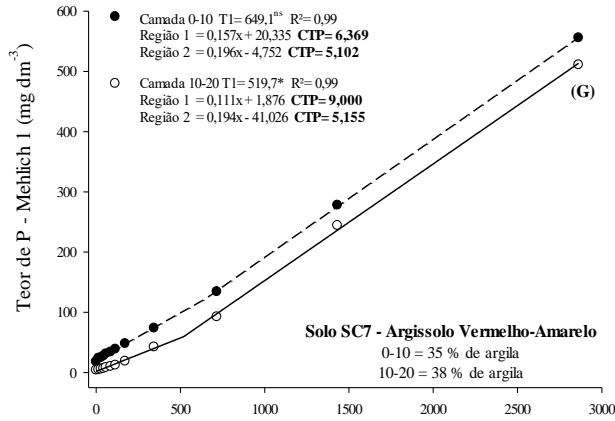


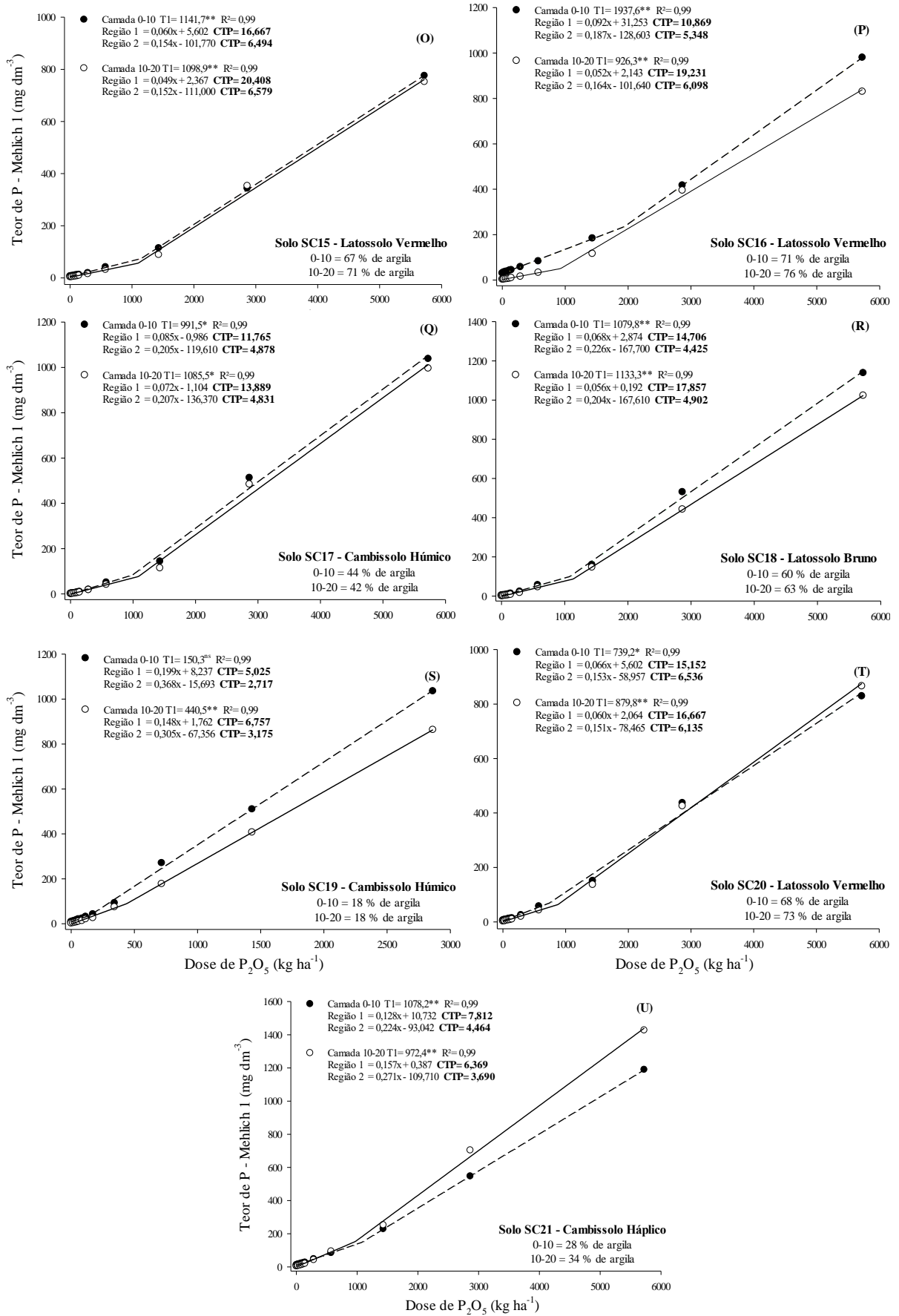


T1: valor de quebra entre os segmentos lineares. **: significativo a 1% de probabilidade de erro. *: significativo a 5% de probabilidade de erro. ns: não significativo estatisticamente.
 Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 13 - Teores de P extraídos por Mehlich 1 em função da adição de doses de P, após incubação de 20 dias, para os solos de SC.







T1: valor de quebra entre os segmentos lineares. **: significativo a 1% de probabilidade de erro. *: significativo a 5% de probabilidade de erro. ns: não significativo estatisticamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O comportamento heterogêneo, especialmente nos solos mais argilosos, indica a ocorrência de alterações na dinâmica do P lábil sob condições de adubação. A menor necessidade de P em solos já enriquecidos com o nutriente, de modo semelhante ao que ocorre em solos com histórico de adubação, indica uma redução do tamponamento do solo, através da neutralização de parte dos sítios de adsorção (BARROW 2015; BARROW e DEBNATH, 2018), especialmente os mais ávidos (RHEINHEIMER et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2014), o que representa uma importante alteração na dinâmica e na eficiência do P que vier a ser aplicado (ZHANG et al., 2018). Em solos argilosos de disponibilidade reduzida de P, a presença de minerais oxídicos, especialmente os menos cristalinizados (BORTOLUZZI et al., 2015), podem adsorver o P sob elevada energia de ligação, inviabilizando sua dessorção e, além disso, dificultar o aumento da disponibilidade em função da adubação. Por outro lado, nestes mesmos solos porém sob adubações sucessivas, a saturação de parte dos sítios de adsorção de P é acompanhado pelo aumento da participação de frações mais lábeis em relação ao total acumulado no solo (BOITT et al., 2018; NUNES et al., 2020).

Zhang et al. (2018), considerando solo conduzido por 18 anos sob diferentes sistemas de adubação, observaram mudanças abruptas na quantidade de P considerada lábil a partir da presença de teores contrastantes no solo. A mudança mais significativa ocorreu numa condição de excedente de adubação (P adicionado – P exportado pelas plantas) acima de 662 kg ha^{-1} do nutriente. A partir desta condição, sob teor lábil no solo de P de 27 mg kg^{-1} , a quantidade de P necessária para elevar sua disponibilidade no solo alterou-se de modo expressivo. Os coeficientes angulares obtidos para a relação entre excedente no solo e teores lábeis foram de 0,04 e 0,29 para condições abaixo e acima do ponto de inflexão, respectivamente. A principal razão apontada para essa alteração foi a parcial saturação dos principais componentes relacionados à adsorção, como óxidos de Ca, Fe e Al e a matéria orgânica. No mesmo sentido, Cubilla et al. (2007), considerando solos do Paraguai com grande contraste textural e histórico de adubação, observaram que a aplicação de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 representou aumentos de 5,5 e $3,0 \text{ mg dm}^{-3}$ no teor extraível de P em solos com alto e baixo histórico de adubação fosfatada, respectivamente.

O aumento da disponibilidade de P altera a superfície das partículas sólidas do solo (BARROW, 1999). Gradualmente, parte dos sítios de adsorção são preenchidos, há aumento do potencial elétrico negativo na superfície e, conseqüentemente, a eficiência da adubação fosfatada tende a aumentar (BARROW, 2015). Segundo este autor, a redução da capacidade

tampão de P em solos com histórico de adubação aumenta a taxa de aproveitamento do nutriente, sendo este processo considerado um “efeito poupador de P” provocado pela prévia adubação com o nutriente.

Por outro lado, a homogeneidade da curva de resposta observada para os solos mais arenosos, sem ocorrência de alterações ao longo das doses aplicadas, pode ser proveniente de suas características em termos de adsorção de P. A constituição desses solos, com baixo conteúdo da fração fina do solo e baixa capacidade de adsorção de P, pode indicar a ausência de sítios de adsorção com contrastante energia de ligação (FINK et al., 2014). Chama a atenção que as curvas de resposta dos solos arenosos possuem semelhanças com a segunda reta obtida nos solos mais argilosos, reforçando a ideia de ocorrência predominante de sítios de ligação de menor afinidade. Ou seja, uma vez saturados parcialmente os sítios de adsorção dos solos mais argilosos, estes passam a ter um comportamento mais próximo ao que é observado em solos arenosos.

Importante destacar ainda que, em todos os solos avaliados no presente estudo, os valores de P em que ocorreram os pontos de quebra, nas equações segmentadas, foram observados em condições de adequada disponibilidade de P, ou seja, acima dos valores de NC. Com base nisso e considerando que o objetivo do presente estudo era avaliar o tamponamento dos solos até a faixa considerada satisfatória às plantas, valores acima do ponto de quebra foram desconsiderados.

O segundo segmento de reta, apesar de não apresentar uma realidade agronômica, pode ser considerado em estudos de poluição ambiental, uma vez que a perda de afinidade do P às partículas de solo potencializa o risco de perdas e contaminação ambiental. Como salientado por Gatiboni et al. (2008), teores elevados de P no solo, especialmente a partir da faixa “muito alto”, mesmo não saturando todos os sítios de adsorção, podem desencadear a transferência do nutriente ao ambiente.

6.2.2 Capacidade tampão de P (CTP) e parâmetros relacionados ao solo

Considerando a ampla variação nos valores de ponto de quebra, foram consideradas, para todos os solos, doses que resultaram em teores extraídos por Mehlich 1 de até 2 vezes o NC, amplitude máxima dentro da classe “alto” (CQFS – RS/SC, 2016). As relações entre as doses de P selecionadas e as quantidades extraídas por Mehlich 1 foram significativas ($p < 0.05$) (Tabela 20). Com base no inverso do coeficiente angular das equações lineares, foi estimada a CTP dos solos (CTP-1). Os valores de CTP-1 variaram entre 2,4 e 27,8 kg ha⁻¹ P₂O₅ nos solos

do RS, e entre 3,5 e 34,5 kg P₂O₅ ha⁻¹ nos solos de SC. Independentemente do local de coleta, os valores de CTP-1 variaram entre 2,4 e 32,2 kg P₂O₅ ha⁻¹ na camada de 0-10 cm e entre 2,7 e 34,5 kg P₂O₅ ha⁻¹ na camada de 10-20 cm, respectivamente.

Tabela 20 - Teores de P extraídos por Mehlich 1 em função da adição de doses de P e os valores de CTP-1 das amostras de solos coletados nos estados do RS e SC.

Id	Equação linear ⁽¹⁾	CTP-1		
		kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	
		0-10 cm	10-20 cm	
RS1	0,038**x + 3,034	26,3	0,036**x + 2,134	27,8
RS2	0,045**x + 5,840	22,2	0,036**x + 2,381	27,8
RS3	0,163*x + 0,722	6,1	0,140*x + 0,729	7,1
RS4	0,053**x + 13,391	18,9	0,051**x + 7,270	19,6
RS5	0,052**x + 4,958	19,2	0,058**x + 2,070	17,2
RS6	0,041**x + 1,538	24,4	0,041**x + 1,036	24,4
RS7	0,252**x + 7,060	4,0	0,202**x + 2,986	5,0
RS8	0,080**x + 9,906	12,5	0,068**x + 3,080	14,7
RS9	0,054**x + 7,360	18,5	0,052**x + 5,185	19,2
RS10	0,051**x + 4,132	19,6	0,046**x + 1,666	21,7
RS11	0,385**x + 4,267	2,6	0,363**x + 1,866	2,8
RS12	0,256*x + 10,701	3,9	0,241**x + 6,644	4,1
RS13	0,318**x + 4,602	3,1	0,259**x + 1,392	3,9
RS14	0,335**x + 6,504	3,0	0,294**x + 3,478	3,4
RS15	0,407**x + 4,793	2,4	0,353**x + 2,706	2,8
RS16	0,383**x + 14,323	2,6	0,375**x + 6,199	2,7
RS17	0,116**x + 10,442	8,6	0,109**x + 7,274	9,2
RS18	0,070**x + 5,580	14,3	0,057*x + 1,218	17,5
RS19	0,087**x + 4,980	11,5	0,088**x + 1,108	11,4
RS20	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	0,316**x + 25,758	3,2
SC1	0,283**x + 6,487	3,5	0,230**x + 2,096	4,3
SC2	0,131**x + 4,785	7,6	0,153**x + 0,104	6,5
SC3	0,087**x - 0,125	11,5	0,071**x - 0,632	14,1
SC4	0,094**x + 4,987	10,6	0,097**x + 1,673	10,3
SC5	0,115**x + 26,890	8,7	0,107**x + 3,252	9,3
SC6	0,133**x + 1,902	7,5	0,112**x + 0,610	8,9
SC7	0,170**x + 19,733	5,9	0,084**x + 3,344	11,9
SC8	0,145**x + 4,670	6,9	0,114**x + 2,406	8,8
SC9	0,096**x + 3,926	10,4	0,101**x + 1,177	9,9
SC10	0,067**x + 10,169	14,9	0,066**x + 1,801	15,2
SC11	0,031**x - 0,327	32,2	0,029**x - 0,290	34,5
SC12	0,037**x + 1,839	27,0	0,031**x + 0,494	32,2
SC13	0,049**x + 3,121	20,4	0,044**x + 0,694	22,7
SC14	0,034**x + 2,241	29,4	0,031**x + 0,874	32,2
SC15	0,046**x + 6,741	21,7	0,039**x + 3,102	25,6
SC16	-	-	0,041**x + 2,899	24,4
SC17	0,061**x + 0,939	16,4	0,059**x - 0,112	16,9
SC18	0,054**x + 3,479	18,5	0,045**x + 0,763	22,2
SC19	0,199**x + 8,237	5,0	0,148**x + 1,762	6,7
SC20	0,060**x + 5,987	16,7	0,050**x + 2,575	20,0
SC21	0,106**x + 11,938	9,4	0,110**x + 3,457	9,1

⁽¹⁾ Solo com teores naturais de P acima do nível crítico. CTP: capacidade tampão de fósforo. * significativo a 5% de probabilidade de erro. ** significativo a 1% de probabilidade de erro.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os valores de CTP-1 apresentaram relação significativa com alguns parâmetros de solo, como conteúdo de argila, teor inicial de P, CMAP, P-rem, COT, CTC_{pH7}, e altitude (Tabela

21). A argila foi a variável que melhor se correlacionou com a CTP-1, seguida pela CMAP. O aumento da capacidade tampão em função do maior conteúdo de argila era esperado e é sustentado na literatura (GATIBONI et al., 2015; ROGERI et al., 2016). Solos mais argilosos tendem a apresentar maior conteúdo de Fe e Al, elementos ligados diretamente à adsorção de P (FINK et al., 2014; BORTOLUZZI et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2020a). Desta forma, quanto maior o conteúdo de argila mais alta a necessidade de P, via fertilizantes, para atingir determinado valor do nutriente no solo. Além disso, solos mais argilosos apresentam maior CMAP (OLIVEIRA et al., 2014; VOLF; ROSOLEM, 2020), sendo ambas as variáveis fortemente correlacionadas. Os percentuais de P recuperados, em relação ao total adicionado, são menores em solos mais argilosos (Apêndices 8 e 9), em função da maior capacidade sortiva destes solos e pela parcial exaustão do método Mehlich 1 de extrair P em solos de elevado conteúdo de argila (FREITAS et al., 2013).

Tabela 21 - Correlação entre as variáveis analisadas, para as camadas 0-10 e 10-20 cm, considerando o conjunto de solos coletados nos estados do RS e SC.

Id	CTP	Argila	P-M1	P-rem	CMAP	EA	COT	CTC	Ca	Mg	K	Altitude
Camada 0-10 cm												
CTP-1		***	**	***	***	ns	**	***	***	***	ns	***
Argila	0,86		ns	***	***	ns	*	***	***	***	ns	***
P-M1	-0,49	-0,14		*	*	ns	ns	*	**	*	ns	*
P-rem	-0,73	-0,74	0,35		***	ns	***	***	***	***	ns	***
CMAP	0,82	0,76	-0,38	-0,88		ns	***	***	***	***	ns	***
EA	0,08	0,25	-0,04	-0,08	0,01		ns	ns	ns	ns	ns	ns
COT	0,48	0,37	-0,29	-0,69	0,62	-0,09		***	***	***	ns	***
CTC	0,69	0,69	-0,36	-0,85	0,83	0,03	0,69		***	***	ns	***
Ca	0,69	0,69	-0,40	-0,81	0,79	0,03	0,68	0,95		***	ns	***
Mg	0,59	0,58	-0,36	-0,81	0,79	0,03	0,74	0,95	0,89		ns	***
K	0,05	0,09	-0,01	0,02	0,01	-0,05	0,14	0,23	0,16	0,16		ns
Altitude	0,62	0,59	-0,39	-0,75	0,79	0,02	0,64	0,69	0,70	0,70	-0,21	
Camada 10-20 cm												
CTP-1		***	**	***	***	ns	**	***	***	***	ns	
Argila	0,84		ns	***	***	ns	**	***	***	***	ns	***
P-M1	-0,44	-0,25		**	**	ns	**	ns	ns	*	ns	**
P-rem	-0,74	-0,77	0,42		***	ns	***	***	***	***	ns	***
CMAP	0,82	0,76	-0,42	-0,88		ns	***	***	***	***	ns	***
EA	-0,16	-0,17	-0,17	-0,09	-0,22		ns	ns	ns	ns	ns	ns
COT	0,42	0,40	-0,41	-0,68	0,65	0,13		***	***	***	ns	***
CTC	0,65	0,59	-0,23	-0,82	0,75	0,07	0,68		***	***	ns	***
Ca	0,52	0,55	-0,20	-0,79	0,71	0,11	0,64	0,98		***	ns	***
Mg	0,50	0,51	-0,38	-0,78	0,73	0,08	0,71	0,95	0,92		ns	***
K	-0,11	-0,01	0,04	0,06	-0,08	-0,10	0,10	0,20	0,15	0,18		na
Altitude	0,64	0,59	-0,45	-0,72	0,79	-0,15	0,69	0,59	0,57	0,64	-0,22	

CTP: CTP-1. ***: significativo a 0,1% de probabilidade de erro. **: significativo a 1% de probabilidade de erro. *: significativo a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O teor de P inicial apresentou correlação negativa com os valores de CTP, indicando a redução do tamponamento dos solos com o aumento do P disponível do solo. Schlindwein et

al. (2013) observaram pequenos decréscimos na capacidade tampão de solos do RS com acréscimo na disponibilidade inicial do nutriente, atribuindo isso à saturação de parte dos sítios de adsorção. Em estudo de Cubilla et al. (2007) a quantidade de fertilizante fosfatado para elevar em 1 mg dm^{-3} o teor extraído por Mehlich 1 foi quase duas vezes menor em solo com histórico de adubação em comparação a solo deficiente no nutriente. Como já destacado, a aplicação continuada de P tende a alterar gradualmente a superfície das partículas do solo, através da saturação dos sítios mais ávidos por P (OLIVEIRA et al., 2014) e o aumento do potencial elétrico negativo (BARROW, 2015). Como resultado, aplicações subsequentes de fertilizantes fosfatados apresentam maior eficiência de aproveitamento em relação a aplicações realizadas previamente (BARROW & DEBNATH, 2018; WITHERS et al., 2018; THUY et al., 2020).

A relação significativa de outros parâmetros com a CTP-1 também é justificada na literatura. O P-rem, com forte correlação negativa com a CTP-1, é um indicativo da capacidade de adsorção do solo, no qual valores mais baixos representam um maior potencial de dreno do solo (ROGERI et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2020a). A correlação positiva com a CTC potencial do solo ocorre em função da elevada correlação destas com a argila.

A CTP-1 teve correlação positiva com o COT. O COT é o principal componente da matéria orgânica do solo, sendo a relação desta com a dinâmica do P no solo considerada ambígua: pode tanto atuar no aumento da disponibilidade, pela redução na capacidade de adsorção (ALMEIDA et al., 2003; YANG et al., 2019), como na elevação da capacidade de adsorção (ABDALA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2020a). Cabe salientar, porém, que essa relação entre CTP e COT também pode ser indireta (EBERHARDT et al., 2008), uma vez que o aumento do conteúdo de C também tem relação positiva com o conteúdo de argila.

O aumento da CTP em função do aumento da altitude dos locais de coleta dos solos decorre do aumento da capacidade de adsorção nestas condições, devido ao maior conteúdo de matéria orgânica, menores temperaturas e predomínio de formas menos cristalinizadas dos minerais (FINK et al., 2014; BORTOLUZZI et al., 2015; ANTONANGELO et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020a). A influência da mineralogia do solo na dinâmica do P é marcante. Solos com predomínio de óxidos, devido aos altos valores de ponto de carga zero, apresentam elevada capacidade de adsorção de P (Goldberg et al., 1996). Na região Sul do Brasil predominam óxidos de ferro, como a hematita e a goethita, sendo esta última, formada em topografias mais elevadas e com maior acúmulo de matéria orgânica, grande área superficial específica e, conseqüentemente, alta capacidade de adsorver P (BORTOLUZZI et al., 2015; FINK et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2020a).

Considerando as variáveis destacadas (argila, P inicial, P-rem, CMAP, CTC, COT e altitude), foi possível gerar uma equação linear múltipla através da opção “Backward stepwise”, a qual busca explicar os valores de CTP-1, independentemente da camada de solo. Apenas argila, P inicial e P-max apresentaram um ajuste significativo. A equação definida foi: “ $CTP-1 = 0,323 + 0,235argila - 0,219P_{inicial} + 0,004CMAP$ ” ($R^2 = 0,80$, $r = 0,89$, $p < 0,001$). Com base nisso, a consideração desses fatores para fins de adubação pode representar avanços em termos de eficiência e minimização de erros. A consideração da CMAP, porém, deve ser tomada com cuidado, especialmente por não ser uma análise realizada em laboratórios de rotina, diferentemente do P extraível e do conteúdo de argila. Com base nisso, a sequência do trabalho buscou dar atenção às relações entre a capacidade tampão dos solos com o conteúdo de argila e os teores extraíveis de P. Essas duas variáveis já são consideradas por metodologias de recomendação de adubação fosfatada no Brasil (SOUSA; LOBATO, 2002; CQFS – RS/SC, 2016).

6.2.3 Variações da CTP em função da argila e da disponibilidade inicial de P

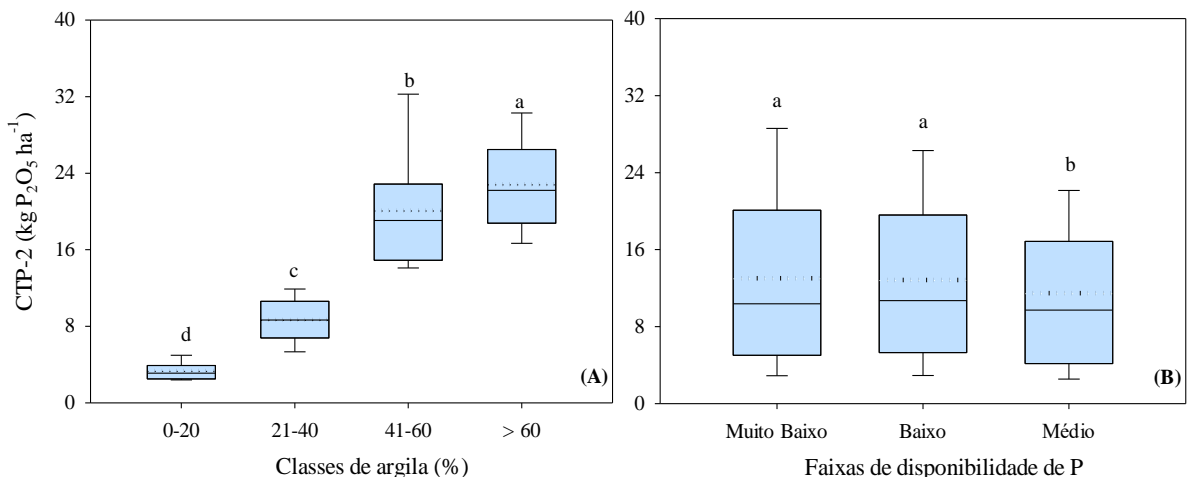
As equações lineares que deram origem aos valores de CTP-2 foram significativas ($p < 0,05$). Neste mesmo sentido, o agrupamento dos valores de CTP-2 dentro das classes de argila e das faixas de disponibilidade preconizadas pela CQFS-RS/SC (2016) foi também significativo (Figura 14), porém não houve diferenças entre as camadas amostradas. Cabe salientar que a ausência de diferenças entre a camada superficial e subsuperficial pode ser relacionado a efeitos de diluição. Esta possibilidade é destacada por Fink et al. (2014) que, comparando solos conduzidos por longos períodos sob diferentes sistemas de manejo, também não observaram diferenças importantes entre as camadas 0-10 e 10-20 cm; esta indiferença estaria relacionada à prevalência de maiores diferenças quando se consideram os centímetros de solo mais superficiais, nos quais o conteúdo de matéria orgânica é significativamente diferente ao restante do solo. Diante disso, tratar-se-ão de modo equivalente os resultados das duas camadas de solo.

Com base nas três faixas de disponibilidade de P preconizadas pela CQFS – RS/SC (2016), independentemente da classe de argila, os valores obtidos nas faixas “muito baixo” e “baixo” foram estatisticamente equivalentes, com média de $14,6 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, valor 18,1% superior ao observado para a classe “médio”. Esse comportamento observado difere do que é preconizado pela CQFS – RS/SC (2016), a qual considerada que apenas há variações no

tamponamento de P quando a disponibilidade de P passa de “muito baixo” para “baixo”, com redução de 33%, sem qualquer alteração entre as classes “baixo” e “médio”.

Quanto à argila, independentemente da classe de disponibilidade de P, os menores valores de CTP foram obtidas na classe <20% de argila, com 3,34 kg P₂O₅ ha⁻¹, enquanto as classes com 21-40, 41-60 e >60% apresentaram valores 2,6, 5,9 e 6,9 vezes superiores, respectivamente (Figura 14). O aumento do tamponamento do solo com o incremento no conteúdo de argila está implícito nas recomendações atuais, através da recomendação das mesmas dosagens de P para valores diferentes de NC. Contudo, esses valores de CTP implícitos na recomendação atual (CQFS – RS/SC, 2016) são bem inferiores ao observado no presente estudo. Os NC de P para as culturas de grãos, de acordo com a CQFS – RS/SC (2016), são 30,0, 18,0, 12,0 e 9,0 mg dm⁻³ para os solos com <20%, 21-40, 41-60 e >60 de argila, respectivamente. Com base nesses valores de NC e no valor intermediário da amplitude das três faixas de disponibilidade propostas pela CQFS – RS/SC (2016), os valores de CTP em que um determinado solo estivesse classificado quanto à disponibilidade de P em “muito baixo”, “baixo” e “médio” seriam de 17,7, 13,3 e 13,3 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para solos com conteúdo >60% de argila, 13,3, 10,0 e 10, kg ha⁻¹ de P₂O₅ para solos com 41-60% de argila, 8,9, 6,7 e 6,7 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para solos com 21-40% de argila e 5,3, 4,0 e 4,0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para solos com <20% de argila, respectivamente.

Figura 14 - Agrupamento dos valores de capacidade tampão de fósforo (CTP-2) de acordo com classes de argila (A) e faixas de disponibilidade de fósforo (B).



Em ambas as figuras, letras distintas indicam que há diferenças estatísticas significativas pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). As linhas horizontais pontilhadas representam as médias.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As discrepâncias entre os resultados do presente estudo e os valores indicados pela CQFS – RS/SC (2016) são maiores quanto maior o conteúdo de argila do solo, comportamento

também observado por outros estudos na região. Rogeri et al. (2016), considerando solos do RS, obteve tamponamento de P semelhante, observando quantidades médias de 65 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para elevar 1 mg dm⁻³ de P, extraído por Mehlich 1, em solos com >60% de argila. Por outro lado, Schlindwein e Gianello (2008), considerando experimentos conduzidos sob sistema de plantio direto (SPD) no RS, observaram tamponamentos mais próximos aos considerados pela CQFS – RS/SC (2016). Os valores obtidos neste trabalho de 2008, para a camada de 0-20 cm, foram de 7.5, 10.0, 15.0, 20.0 e 30.0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para elevar em 1 mg dm⁻³ o teor de P, extraído por Mehlich 1, em solos com <10, 10-25, 26-40, 41-55 e >55% de argila, respectivamente.

Um ponto importante a ser considerado, justificando os elevados valores obtidos no presente estudo, é o grau de moagem e pulverização do solo. A maior necessidade de P em decorrência da intensa mobilização do solo decorre do contato do fertilizante com maior volume de solo e da quebra de agregados do solo. Com isso, há exposição de sítios de adsorção de P antes protegidos, elevando a capacidade sortiva do solo, em comparação ao mesmo solo, porém sob SPD (WANG et al., 2001; GATIBONI et al., 2019). Em um solo cultivado sob SPD, por exemplo, a agregação do solo contribui com a redução da quantidade de sítios de ligação que estão expostos, reduzindo o tamponamento “ativo” do solo. Wang et al. (2000), considerando um grupo de 10 solos do Hawaii, destacou que a consideração de parâmetros como o tamanho de agregados, especialmente para solos com elevado conteúdo de argila e constituição mineralógica heterogênea, pode melhorar a estimativa do poder tampão.

6.2.4 Ajustes nas doses de adubação fosfatada corretiva para solos do RS e SC

A tabela 22 apresenta a associação dos valores de CTP-2 em função das diferentes classes de argila e das classes de disponibilidade de P. Importante destacar que, apesar de não haver interação estatística entre os fatores “classes de argila” e “faixas de disponibilidade de P”, a consideração de ambos pode representar uma recomendação de adubação mais fidedigna. Como não houve diferenças significativas em função da camada amostrada, os resultados apresentam os valores médios entre as camadas 0-10 cm e 10-20 cm, multiplicados por dois, já que a adubação de correção total é realizada na camada de 0-20 cm.

Tabela 22 - Valores de CTP-2 em função de classes de argila e faixas de disponibilidade de fósforo para recomendação de adubação fosfatada de correção nos solos do RS e SC.

Classe de argila %	Classe de disponibilidade de P	
	Muito Baixo e Baixo	Médio
	kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	
	CTP-2 – Camada 0-20 cm	
<20	7,85 ⁽¹⁾	6,25
21-40	18,00	16,05
41-60	42,63	31,75
>60	48,35	42,60

⁽¹⁾Valores de CTP-2 que representam as necessidades, em kg de P₂O₅ ha⁻¹, para elevar em 1 mg dm⁻³ a disponibilidade de P em uma camada de 20 cm de solo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os dados da tabela 22 podem ser utilizados para a criação de uma tabela de recomendação de adubação corretiva com maiores detalhamentos. A tabela 23, baseada em modelo apresentado por Seixas et al. (2020), fornece recomendações de P para diferentes condições de solo, em função do conteúdo de argila e dos teores de P disponível.

Tabela 23 - Doses de P (P₂O₅) para adubação de correção total, considerando o conteúdo de argila e os teores disponíveis de P no solo.

P – Mehlich 1 mg dm ⁻³	Conteúdo de argila (%)			
	<20	21-40	41-60	>60
1	227,7	306,0	468,9	386,8
2	219,8	288,0	426,3	338,45
3	212,0	270,0	383,7	290,1
4	204,1	252,0	341,0	241,75
5	196,3	234,0	298,4	193,4
6	188,4	216,0	255,8	145,05
7	180,6	198,0	213,2	85,2
8	172,7	180,0	170,5	42,6
9	164,9	162,0	95,3	M
10	157,0	144,0	63,5	
11	149,2	126,0	31,8	
12	141,3	108,0	M	
13	133,5	80,3		
14	125,6	64,2		
15	117,8	48,2		
16	109,9	32,1		
17	102,1	16,1		
18	94,2	M		
19	86,4			
20	78,5			
21	56,3			
22	50,0			
23	43,8			
24	37,5			
25	31,3			
26	25,0			
27	18,8			
28	12,5			
29	6,3			
30	M ⁽¹⁾			

⁽¹⁾ Adubação de manutenção (M), com base na espécie agrícola de interesse e rendimento pretendido.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Com base na tabela 22 e nos valores naturais de P no solo e valores de NC, é possível recomendar a adubação de correção, conforme a equação 1 ($QAC (kg \text{ de } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}) = (P \text{ final} - P \text{ inicial}) * CTP-2$). Uma simulação da utilização desta equação, com base nos valores de CTP-2, em comparação à recomendação atualmente vigente (CQFS – RS/SC, 2016), é apresentada na figura 15.

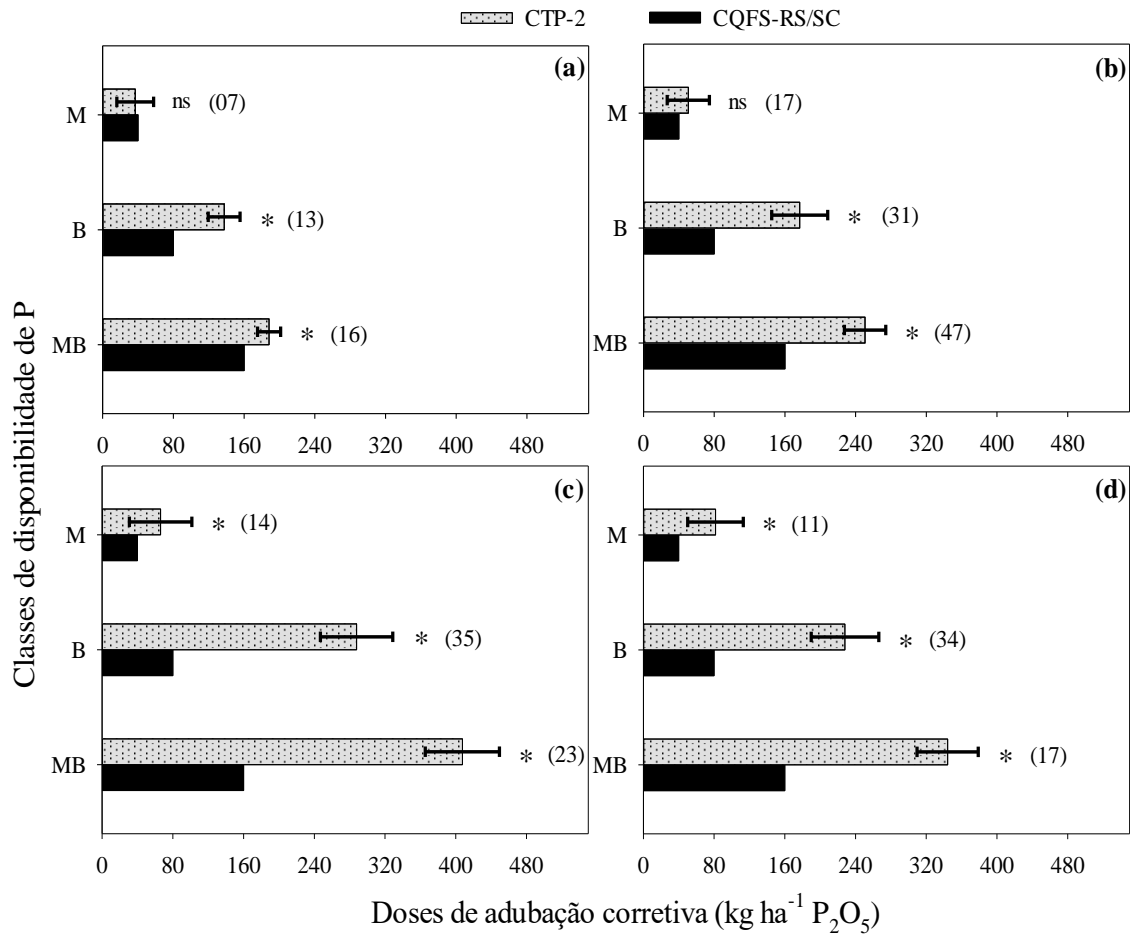
Considerando as 270 amostras de solos pré-selecionadas, percebem-se diferenças representativas entre as quantidades de P recomendadas pela CQFS-RS/SC (2016) e as recomendações baseadas no presente estudo. Essas diferenças são maiores quanto maior o conteúdo de argila do solo. Considerando as classes de disponibilidade de P, as duas recomendações são similares para a faixa “médio”, mas, considerando solos nas faixas “muito baixo” e “baixo”, os valores recomendados pela tabela da CQFS – RS/SC, (2016) são inferiores.

De modo geral, independentemente da classe de disponibilidade, as recomendações médias de correção considerando os resultados do presente estudo são 1.3, 1.7, 2.6 e 2.3 vezes superiores ao preconizado pela CQFS – RS/SC, (2016), considerando conteúdo de argila entre 0-20, 21-40, 41-60 e >60%, respectivamente. No mesmo sentido, mas considerando as variações entre as classes de disponibilidade de P, independentemente das classes de argila, as recomendações médias de correção baseado nos resultados do presente estudo são 1.9, 2.6 e 1.3 vezes superiores ao preconizado pela CQFS – RS/SC, (2016), nas faixas classificadas como “muito baixo”, “baixo” e “médio”, respectivamente.

A simulação com esse grupo de solos evidencia as discrepâncias nas doses de P exigidas pelos solos, especialmente os mais argilosos, para alcançar a faixa adequada. Estes resultados corroboram as observações de Rogeri (2013), considerando um conjunto de solos do RS. Após incubação de 30 dias com doses de P, foi realizada a extração do conteúdo lábil do nutriente e calculada a capacidade tampão, nos mesmos moldes do procedimento realizado no presente estudo. As quantidades de P recomendadas para adubação de correção do solo, com base nos valores obtidos na incubação, foram superiores aos valores recomendados pela CQFS no manual de adubação e calagem de 2004 (CQFS – RS/SC, 2004) para mais de 80% dos solos. Os valores de CTP obtidos no presente estudo, assim como os obtidos por Rogeri (2013), aproximam-se aos valores recomendados para a região do Cerrado brasileiro, cujas amplitudes variam entre 5 e 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para aumentar o conteúdo de P-Mehlich em 1 mg dm⁻³, considerando solos com 10-15 e 66-70% de argila, respectivamente.

Figura 15 - Comparação entre as recomendações de adubação fosfatada de correção entre as metodologias adotadas pela CQFS – RS/SC (2016) e a sugerida pelos valores de CTP-2,

considerando solos com 0-20 (a), 21-40 (b), 41-60 (c) e >60% de argila (d), de 270 amostras de solo de SC.



MB: muito baixo, B: baixo, M: médio * Significativo a 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$). ns: não significativo estatisticamente. Valores entre parênteses representam os números de repetições (solos dentro de cada faixa de disponibilidade).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O uso de valores tabelados e separados em função de classes, apesar de representar um avanço em comparação a dosagens únicas, ainda pode apresentar desvios. Desta forma, são levantadas algumas indagações, como: a dosagem fosfatada corretiva real para um solo com 22% de argila e outro com 35% de argila, ambos na mesma classe, será a mesma? E se este solo de 35% fosse coletado em duas glebas distintas, ambas na faixa de disponibilidade “muito baixo”, porém uma com valor de 1 mg dm^{-3} e outra com valor de 5 mg dm^{-3} , a recomendação seria a mesma? Ambas as condições devem apresentar desvios, especialmente em função das classes de argila.

Uma alternativa para corrigir os erros acima mencionados seria a consideração das variações no conteúdo de argila e de P inicial independentemente de classes. Com base nisso, considerando os valores de CTP-2 obtidos através da incubação de cada solo e sua interação com conteúdo de argila e os valores iniciais de P, obtidas para cada relação “doses de P x P extraído por Mehlich 1”, foi gerada a equação 2, apresentada abaixo.

$$CTP-2 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ de P}_2\text{O}_5) = 0,44 + (0,80 * \text{argila}) - (0,02 * \text{argila} * P \text{ inicial}) \quad \text{Equação 2}$$

Em que “CTP” é a quantidade de P_2O_5 ha^{-1} para elevar em 1 mg dm^{-3} os teores de P em uma camada de 10 cm; “argila” representa o conteúdo da fração argila pelo método da pipeta, em percentagem; “P inicial” representa a quantidade de P extraível em Mehlich 1. Todos os coeficientes foram estatisticamente significativos ($R^2 = 0,78^{**}$ e $r = 0,88^{**}$).

A estimativa de recomendação de adubação de correção, para os 270 solos selecionados, com base nos valores estimados de CTP-2 pela equação 2, teve elevada correlação com as dosagens obtidas diretamente, com base nos valores tabelados ($r = 0,87 = p < 0,01$). A determinação de dosagens através da equação mencionada apresenta como inconvenientes a ocorrência de valores negativos de CTP, especialmente em solos de baixo conteúdo de argila, e, concomitantemente, valores de P disponível elevados. Com base nisso, a adoção de valores tabelados pode ser considerada uma melhor estimativa.

6.3 CONCLUSÕES

As recomendações de adubação de correção atualmente vigentes nos estados do RS e SC são insuficientes para alcançar os níveis críticos, especialmente para solos com mais de 40% de argila.

A argila e a quantidade inicial de P devem ser considerados para uma melhor estimativa da adubação de correção total. Com base nas classes já utilizadas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o tamponamento de P dos solos deve ser separado pelas quatro classes de argila (até 20, entre 21-40, entre 41-60 e maior que 60%) e pelas faixas de disponibilidade “muito baixo e baixo” com a faixa “médio”. O grau de mobilização do solo pode influenciar diretamente com a obtenção de altos valores de tamponamento. Neste sentido, recomendar as mesmas doses de correção para solos sob diferentes sistemas de manejo pode resultar em grandes desvios. Assim, há necessidade de mais estudos neste sentido, buscando delimitar as reais doses de adubação de correção para cada sistema de manejo do solo, levando em consideração a resposta das plantas.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O P é um dos nutrientes que mais limita a produtividade agrícola em solos de regiões tropicais e subtropicais. Nestas regiões, as quantidades aplicadas normalmente superam a demanda das plantas. Além disso, há preocupação com as reservas de rochas fosfáticas no mundo, tanto sob o ponto de vista de escassez global como pela concentração em poucas

regiões. Como aspecto paralelo, a população mundial e a demanda por maior quantidade de alimentos continuam crescendo. Considerando todos estes aspectos, compreende-se a elevada preocupação em desenvolver estudos científicos que busquem melhorar a eficiência no uso dos fertilizantes fosfatados.

A estratégia de realizar a distribuição de P em maior volume de solo (adubação de correção) possibilita às raízes encontrar mais nutriente em regiões nas quais encontra maior disponibilidade hídrica em períodos de estiagem. Desta forma, a implantação e/ou renovação de um sistema de cultivo conservacionista, como o SPD, deve buscar incorporar P ao menos até a camada de 20 cm.

Atualmente, muitas áreas com SPD consolidado podem ter uma distribuição heterogênea de P no perfil do solo, com elevados teores em superfície e baixos teores nas camadas subsuperficiais; nestas áreas, a simples incorporação do solo, sem qualquer adubação, pode permitir bons teores do nutriente em toda a camada arável. O principal problema envolvido acaba sendo justamente o revolvimento, pois significa parcial ou completa renovação do SPD. Em situações nas quais os rendimentos agrícolas são satisfatórios, sem outros problemas químicos ou físicos em subsuperfície, o revolvimento apenas para distribuir P em profundidade pode não se justificar. Além disso, deve-se atentar ao maior risco de perdas por erosão quando é realizado o revolvimento, especialmente em períodos chuvosos e áreas declivosas.

Já em áreas com baixo conteúdo de P disponível em toda a camada arável, há necessidade de aplicação de fertilizantes. As necessidades de fertilizantes fosfatados para alcançar os níveis críticos, especialmente em situações nas quais há revolvimento e o solo em questão apresenta alta capacidade tampão, podem ser consideráveis. Além disso, as doses atualmente indicadas para adubação de correção podem estar subestimadas, especialmente em solos mais argilosos. Nestes casos em que há necessidade de realizar a adubação corretiva de P, duas estratégias podem ser adotadas: i) em casos nos quais se adota o SPD e o único limitante observado é a insuficiência de P, com bons rendimentos agrícolas e sem perdas significativas por estiagens, a melhor opção pode ser a adubação de correção gradual, realizada na linha de semeadura; ii) caso haja outros problemas que também exijam o revolvimento do solo, como presença de camadas compactadas e/ou acidez subsuperficial, a realização de uma adubação corretiva com P, até a camada de 20 cm, é uma prática interessante. Nestes casos, a adubação corretiva irá se comportar como um investimento a longo prazo, pois poderá permitir maior estabilidade nos rendimentos, evitando quedas bruscas de rendimento em safras marcadas por períodos de deficiência hídrica.

Outro aspecto relacionado à adubação fosfatada e que gera bastante discussão é a forma como são realizadas as fertilizações em sistemas de cultivo conservacionistas. O modo tradicional de aplicação é na linha de semeadura, que apresenta benefícios como: parcial incorporação no solo, contato com menor volume de solo e proximidade com as raízes das plantas. Objetivando maior eficiência operacional, vem ganhando espaço a adubação a lanço, na superfície do solo. Em termos técnicos, os rendimentos obtidos com a adubação a lanço podem ser equivalentes aos obtidos com a adubação na linha de semeadura em solos de fertilidade construída, nos quais os teores do nutriente estão adequados. Contudo, há aspectos negativos que precisam ser considerados para a adoção deste modo de aplicação, como a formação de um gradiente de P no solo, com enriquecimento na superfície e empobrecimento em subsuperfície e maiores perdas por escoamento superficial em situações de ocorrência de erosão.

Para evitar a integral adoção da adubação a lanço, há, ao menos, duas alternativas aos agricultores: i) rotação entre os modos de aplicação e ii) adubação de sistemas. Na primeira alternativa, o agricultor pode alternar os modos de fertilização, utilizando a adubação a lanço para determinadas condições, como nas menores janelas de semeadura e com baixo risco de ocorrerem chuvas erosivas; esta estratégia é facilitada quando o produtor possui semeadoras diferentes, como para culturas semeadas em espaçamentos diferentes (soja e trigo, por exemplo). A adubação de sistemas consiste na aplicação concentrada dos fertilizantes exigidos para dois ou mais cultivos, ou seja, aplica-se em um mesmo momento de adubação o que será exigido por ao menos dois cultivos sucessivos. Esta prática é recomendada para solos com fertilidade construída, em que apenas são repostos/restituídos os nutrientes retirados via colheita. Como há redução do número de adubações, o produtor pode selecionar a época mais viável e a forma mais adequada para realizar a fertilização.

A escolha da técnica de adubação deve ser acompanhada de análises rotineiras do solo. Mesmo em áreas que apresentam teores de nutrientes acima do nível crítico, a análise do solo é importante pois permite identificar possíveis alterações ao longo do tempo e, conseqüentemente, realizar intervenções. Além disso, o surgimento constante de cultivares com características e potenciais de rendimento diferentes exigem constantes ajustes nos parâmetros químicos do solo.

Finalmente, destaca-se a necessidade de sempre associar estes aspectos teóricos com as experiências e vivências dos agricultores e técnicos da região de interesse. A escolha das técnicas de adubação, assim como as dosagens, deve ser baseada em resultados de pesquisa científica, experiências locais e no histórico de resposta das plantas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALA, D. B. et al. Residence time and pH effects on the bonding configuration of orthophosphate surface complexes at the goethite/water interface as examined by Extended X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS) spectroscopy. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 442, p. 15-21, 2015.
- ALAM, M. K. et al. Banding of fertilizer improves phosphorus acquisition and yield of zero tillage maize by concentrating phosphorus in surface soil. **Sustainability**, v. 10, p. 1-24, 2018.
- ALLEY, M. M. et al. **Nitrogen and Phosphorus Fertilization of Corn**. of Agriculture and Life Sciences - Virginia Polytechnic Institute and State University: Blacksburg - USA, 2009. p. 1-5.
- ALMEIDA, J. A. et al. Propriedades químicas de um Cambissolo Húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 437-445, 2005.
- ALMEIDA, J. A. et al. Recomendação alternativa de calcário para solos altamente tamponados do Extremo Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 2, n. 4, Santa Maria 1999.
- ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas de fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do Extremo-Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 985-1002, 2003.
- ALVAREZ, V. H.; FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 49-55, 1990.
- ANTONANGELO, J. A. et al. Phosphorus speciation by P-XANES in an Oxisol under long-term no-till cultivation. **Geoderma**, v. 377, p. 1-11. 2020.
- ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: **Nutrição Mineral de Plantas**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1º ed., 2006. 432 p.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2º Edição. 1995. 384 p.
- BARBIERI, D. M. et al. Comportamento dos óxidos de ferro da fração argila e do fósforo adsorvido, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1557-1568, 2013.
- BARBOSA, N. C. et al. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. **Biosci Journal**, v. 31, n. 1, p. 87-95, 2015.
- BARRON, V.; HERRUZO, M.; TORRENT, J. Phosphate adsorption by aluminous hematites of different shapes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p. 647-651, 1988.
- BARRON, V.; TORRENT, J. Surface Hydroxyl Configuration of Various Crystal Faces of Hematite and Goethite. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 177, p. 407-410, 1996.
- BARROW, N. J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant Soil**, v. 397, p. 401-409, 2015.

- BARROW, N. J. The four laws of soil chemistry: the Leeper lecture 1998. **Australian Journal of Soil Research**, v. 37, n. 5, p. 787 – 830, 1999.
- BARROW, N. J.; DEBNATH, A. Three Residual Benefits of Applying Phosphate Fertilizer. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 5, p 1168-1176, 2018.
- BECK, M. H.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; DICK, D. P. Modifications of phosphorus in Latosol as a function of humic acids and acidity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 488-492, 2018.
- BERRUTI, A. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and their value for ecosystem management. *Biodiversity - the Dynamic Balance of the Planet*. p. 159–191. 2014.
- BOITT, G. et al. Fate of phosphorus applied to soil in pig slurry under cropping in southern Brazil. **Geoderma**, v. 31, p. 164-172, 2018.
- 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.
- BROGGI, F. et al. Fator capacidade de fósforo em solos de Pernambuco mineralogicamente diferentes e influência do ph na capacidade máxima de adsorção. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, p. 77-83, 2011.
- CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; PAVINATO, A. **Manejo da adubação**. In: NOVAIS, R. F. et al. *Fertilidade do solo*. 1º Edição. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, v. 01, p. 851-872.
- CESSA, R. M. A. et al. superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois Latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1153-1162, 2009.
- CHIEN, S. H. et al. Review of Maleic-Itaconic acid copolymer purported as urease inhibitor and phosphorus enhancer in soils. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 423-430, 2014.
- CIOTTA, M. N. et al. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1055-1064, 2002.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre, SBCS/NRS, 2016. 376 p.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. **Manual de recomendação de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, SBCS/NRS, 2004. 400 p.
- COSTA, C. E. V. G. A. Patterns in phosphorus and corn root distribution and yield in long-term tillage systems with fertilizer application. **Soil & Tillage Research**, v. 109, p. 41-49, 2010.
- COUTO, R. R. et al. Environmental Vulnerability and Phosphorus Fractions of Areas with Pig Slurry Applied to the Soil. **Journal of Environmental Quality**, v. 44, p. 162-173, 2015.
- CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, n. 64, p. 197-214, 1995.

- CUBILLA, M. M. et al. Calibração visando à fertilização com fósforo para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1463-1474, 2007.
- DALL'ORSOLETTA, D. J. et al. Soil slope and texture as factors of phosphorus exportation from pasture areas receiving pig slurry. **Science of the Total Environment**, 2020.
- DOYDORA, S.; HESTERBERG, D.; KLYSUBUN, W. Phosphate solubilization from poorly crystalline iron and aluminum hydroxides by Avail copolymer. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, p. 20-28, 2016.
- EBERHARDT, D. N. et al. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob pastagens no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1009-1016, 2008.
- EGHBALL, B.; BINFORD, G. D.; BALTENSPERGER, D. D. Phosphorus movement and adsorption soil receiving long-term manure and fertilizer application. **Journal of Environmental Quality**, v. 25, n. 6, p. 1339-1343, 1996.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª edição, Brasília – DF, 2017. 575 p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação do Solo - SIBCS**. 3 ed., Brasília –DF, 2013. 353 p.
- ERIKSSON A. K.; GUSTAFSSON J. P.; HESTERBERG D. Phosphorus speciation of clay fractions from long-term fertility experiments in Sweden. **Geoderma**, v. 241; p. 68–74, 2015.
- ERNANI, P. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages, 2016, 254 p.
- ERNANI, P. R. et al. Decréscimo da retenção de fósforo no solo pelo aumento do pH. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 159-162, 1996.
- ERNANI, P. R.; STECKLING, C.; BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 939-946, 2001.
- FAN, J. et al. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. **Field Crops Research**, v. 189, p. 68-74, 2016.
- FERNÁNDEZ, F. G.; WHITE, C. No-Till and Strip-Till Corn Production with Broadcast and Subsurface-Band Phosphorus and Potassium. **Agronomy Journal**, v. 104, p. 996-1005, 2012.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 109–112, 2014.
- FINK, J. R. et al. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 36, p. 379-387, 2014.
- FINK, J.R. et al. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil & Tillage Research**. v. 155, p. 62-68, 2016.
- FISCHER, P. et al. Phosphorus saturation and superficial fertilizer application as key parameters to assess the risk of diffuse phosphorus losses from agricultural soils in Brazil. **Science of the Total Environment**, p. 1515-1527, 2018.

- FRANCISCO, E. A. B.; CÂMARA, G. M. S. Desafios atuais para o aumento da produtividade da soja. **Informações Agronômicas**, nº 143 - IPNI, Rondonópolis. 2013.
- FRAZÃO, J. J. et al. Agronomic effectiveness of a granular poultry litter-derived organomineral phosphate fertilizer in tropical soils: Soil phosphorus fractionation and plant responses. **Geoderma**, v. 337, p. 582-593, 2019.
- FREITAS, I.F. et al. Phosphorus extracted by ion exchange resins and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 37, p. 667-677, 2013.
- FREITAS, P. L. **Sistema plantio direto**: conceitos, adoção e fatores limitantes. Comunicado Técnico da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 2005. 9 p.
- GATIBONI, L. C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema de plantio direto. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, pg. 691-699, 2007.
- GATIBONI, L. C. et al. Establishing environmental soil phosphorus thresholds to decrease the risk of losses to water in soils from Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p 1-14, 2020.
- GATIBONI, L. C. et al. Samples disturbance overestimates phosphorus adsorption capacity in soils under long-term application of pig slurry. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-11, 2019.
- GATIBONI, L. C. et al. Soil Phosphorus Thresholds in evaluating risk of environmental transfer to surface waters in Santa Catarina, Brazil. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p 1225-1234, 2015.
- GATIBONI, L.C. et al. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1753-1761, 2008.
- GATIBONI, L.C. et al. Phosphorus fractions in soil after successive crops of Pinus taeda L. without fertilization. **Ciência Rural**, v. 47, p. 1-8, 2017.
- GOLDBERG, S.; FORSTER, H. S.; GODFREY, C. L. Molybdenum adsorption on oxides, clay minerals, and soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, p. 425-432, 1996.
- GOLDBERG, S.; SPOSITO, G. On the mechanism of specific phosphate adsorption by hydroxylated mineral surfaces: a review. **Communications in Soil Science and Plant**, v. 6, p. 802-821, 1985.
- GONZALEZ-ERICO, E. et al. of depth of lime incorporation on the growth of corn on an Oxisol of Central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v, 43, p. 1155–1158, 1979.
- GUARDINI R. et al. Accumulation of phosphorus fractions in typical Hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep pig litter in a no-tillage system. **Nutrient Cycling Agroecosystem**, v. 93, p. 215–225, 2012.
- HANSEL, F. D. et al. Deep Banding Increases Phosphorus Removal by Soybean Grown under No-Tillage Production Systems. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 1-8, 2017a.
- HANSEL, F. D. et al. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 1-9, 2017b.

HAVLIN J. L. et al. Phosphorus. In: **Soil Fertility and Fertilizers: an Introduction to Nutrient Management**. 7ª Edição. 2013.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, p. 970-976, 1982.

HESTERBERG, D. Macroscale Chemical Properties and X-Ray Absorption Spectroscopy of Soil Phosphorus. **Developments in Soil Science**, v. 34, p. 313-356, 2010.

HOPKINS, B. G.; HANSEN, N. C. Phosphorus Management in High-Yield Systems. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, p. 1265-1280, 2019.

HUE, N. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, v. 152, n. 6, 463-471, 1991. DOI: 10.1097/00010694-199112000-0000

JIN, K. et al. Wheat root growth responses to horizontal stratification of fertiliser in a water-limited environment. **Plant Soil**, v. 386, p. 77-88, 2015.

KANG, L.; YUE, S. LI, S. Effects of Phosphorus Application in Different Soil Layers on Root Growth, Yield, and Water-Use Efficiency of Winter Wheat Grown Under Semi-Arid Conditions. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 13, p. 2028-2039, 2014

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

LI, H. et al. Soybean root traits after 24 years of different soil tillage and mineral phosphorus fertilization management. **Soil & Tillage Research**, v. 165, p. 258-267, 2017.

LINKOHR, B. I. et al. Nitrate and phosphate availability and distribution had different effects on root system architecture of *Arabidopsis*. **The Plant Journal**, v. 29, p. 751-760, 2002.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; CUNHA, J. F. Superfosfato simples e outros fertilizantes fosfatados solubilizados industrialmente via rota do ácido sulfúrico. **Associação Nacional para Difusão de Adubos – ANDA**. 2ª Edição. 2016. 72 p.

LU, D. et al. Integrated phosphorus placement and form for improving wheat grain yield. **Agronomy Journal**, v. 111, p. 1998-2004, 2019.

LU, D. et al. Wheat growth as affected by combinations of phosphate dose and patch size. **Agronomy Journal**, v. 110, p. 707-714, 2018.

MENDES, I. C. et al. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. **Circular Técnica** – 38, Embrapa Cerrados. 2018. 24 p.

MENEZES-BLACKBURN, D. et al. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. **Plant Soil**, v. 427, p. 5-16, 2018.

MODEL, N. S.; ANGHINONI, I. Resposta do milho a modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p. 55-59, 1992.

MOTTA, A. C. V.; MELO, V. F. Química dos solos ácidos. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo: parte 2 – aplicações**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa – MG, 2009. p. 313-380.

- MUMBACH, G. L. et al. Phosphorus Extraction with Soil Test Methods Affected by Soil P Sorption Capacity. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 1882-1890, 2020.
- MURPHY, J. RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v 27, p. 31-36, Oxford, 1962.
- NEPAR – Núcleo Estadual Paraná. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba, SBCS/NEPAR, 2017. 482 p.
- 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.; MELLO, J.W.V. Relação solo-planta. In: **Fertilidade do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1º ed., 2007. 1017 p.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399p.
- NUNES, M. R. et al. Corn root and soil health indicator response to no-till production practices. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 285, p. 2-12, 2019.
- NUNES, R. S. et al. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 877-888, 2011.
- NUNES, R. S. et al. Distribution of soil phosphorus fractions as a function of long-term soil tillage and phosphate fertilization management. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, p. 1-12. 2020.
- OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C. Manejo da adubação fosfatada em solos de Cerrado: qual é o custo agrônômico da operacionalidade da aplicação a lanço? **Anais: Workshop CTC Agricultura**, p. 21-26. Rio Verde, 2013.
- OLIVEIRA, C. M. B. et al. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo Langmuir. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1805-1815, 2014.
- OLIVEIRA, J. S. et al. Soil properties governing phosphorus adsorption in soils of Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 22, e00318, 2020a.
- OLIVEIRA, L. E. Z. et al. Long-term phosphate fertilization strategies evaluation in a Brazilian Oxisol. **Agronomy Journal**, v. 112, 2020b.
- OLIVEIRA, R. et al. Mineralogy and maximum phosphorus adsorption capacity in soybean development. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, p. 242-257, 2018.
- PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, v. 30, p. 1-50, 1978.
- PAVINATO, P. S. et al. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, p. 1-11, 2020.
- 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.
- PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. Organic compounds from plant extracts and their effect on soil phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 10, p. 1379-1388, 2008.

- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences.**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.
- PEIXOTO, D. S. P. et al. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 745, p. 1-14, 2020.
- PÉRET, B. et al. Root architecture responses: in search of phosphate. **Plant Physiology**, v. 166, p. 1713-1723, 2014.
- POTTKER, D. Aplicação de fósforo no sistema plantio direto. **Boletim de pesquisa - Embrapa Trigo**, n. 2, 1999. 32 p.
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; ROQUE, C. G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 83-90, 2001.
- PROCHNOW, L. I. et al. Localização do fósforo em culturas anuais na agricultura nacional: situação importante, complexa e polêmica. **Informações Agronômicas**, IPNI - BRASIL, nº 158, 2017.
- R Core Team (2020). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, **Palo Alto**, v. 50, p. 665-693, 1999.
- RAIJ, B. Van et al. (Ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100)
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. IPNI: International Plant Nutrition Institute, Piracicaba/SP, 2011. 420 p.
- REICHARDT, K. Como superar o veranico no cerrado. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato – POTAFOS. **Informações Agronômicas** nº 32, p. 1-2, 1985.
- RESENDE, A. V. et al. Balanço de nutrientes e manejo da adubação em solos de fertilidade construída. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 10, p. 342-398, 2019.
- RESENDE, A. V. et al. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas** – IPNI, n. 156, dezembro de 2016.
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 345-354, 2000.
- ROGERI, D. A. et al. Substitution of clay content for P-remaining as an index of the phosphorus buffering capacity for soils of Rio Grande do Sul. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-14, 2016.
- ROGERI, D. A. Uso do índice P-remanescente como indicador do poder tampão de fósforo em solos. **Tese (Doutorado em Ciência do Solo)** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2013.
- ROLIM NETO, F. C. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 953-964, 2004.

- ROSA, A. T. et al. Phosphorus fertilizer optimization is affected by soybean varieties and placement strategy. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, p. 1-14, 2020.
- ROSOLEM, C. A.; MERLIN, A. Soil phosphorus availability and soybean response to phosphorus starter fertilizer. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1467-1495, 2014.
- ROY, E. D. et al. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 249, p. 206-214, 2017.
- SÁ, J. C. M.; BRIEDIS, C.; FERREIRA, A. O. No-till corn performance in response to P and fertilization modes. **Revista Ceres**, v. 60, p. 96-101, 2013.
- SANTOS, D. R.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 41-49, 2003.
- SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008a.
- SANTOS, H. G. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª Edição, revisado e ampliado – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.
- SANTOS, J. Z. L. et al. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 705-714, 2008b.
- SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2037-2049, 2008.
- SCHOUMANS, O.F. Determination of the degree of phosphorus saturation in non-calcareous soils. In: KOVAR, J.L.; PIERZYNSKI, G.M. **Methods of phosphorus analysis for soil, sediments, residuals and waters**. Blacksburg, Virginia Tech University, 2009. 29-33.
- SEIXAS, C. D. S. et al. Tecnologias de produção de soja. **Sistemas de Produção** – Embrapa Soja. 2020. 347 p.
- SHEN, J. et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, p. 997-1005, 2011.
- SINGH, D. K.; SALE, P. W. G.; ROUTLEY, R. R. Increasing phosphorus supply in subsurface soil in northern Australia: Rationale for deep placement and the effects with various crops. **Plant and Soil**, v. 269, p. 35-44, 2005
- SOUSA, D. M. G. et al. Manejo do Fósforo na Região do Cerrado. In: RILNER, A. F.; CUNHA, P. P. (Eds.) **Práticas de Manejo do Solo para Adequada Nutrição de Plantas no Cerrado**. Goiânia: UFG, 2016. p. 291-357.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 416 p.
- SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A. Manejo da fertilidade do solo para culturas anuais: experiências no Cerrado. **Informações Agronômicas** – IPNI, n. 126, junho de 2009.

- SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A. Soil fertility evaluation and control for annual crops in the Cerrado. **Better Crops**, v. 95, n. 3, 2011.
- STEFFENS, D. et al. Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 173, p. 765–771, 2010.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3ª Edição, 2004. 719 p.
- TEDESCO, M. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 1995, 174 p.
- THIOUB, M. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation enhances phosphorus use efficiency and soybean productivity on a Haplic Acrisol. **Soil & Tillage Research**, v. 192, p. 174-186, 2019.
- THUY, P. T. P. et al. Reducing Phosphorus Fertilizer Input in High Phosphorus Soils for Sustainable Agriculture in the Mekong Delta, Vietnam. **Agriculture**, v. 10, p. 1-11, 2020.
- TOLEDO, J. A. 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, p. 427-435, 2012.
- VIEIRA, R. C. B. et al. Adubação fosfatada para alta produtividade de soja, milho e cereais de inverno cultivados em rotação em Latossolos em plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 794-808, 2015.
- VOLF, M. R.; ROSOLEM, C. A. Soil P diffusion and availability modified by controlled-release P fertilizers. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 2020.
- WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v. 15, p. 1-19, 1976.
- WANG, X. et al. Predicting Soil Phosphorus Buffer Coefficients Using Potential Sorption Site Density and Soil Aggregation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 240-246, 2000.
- WANG, X.; YOST, R. S.; LINQUIST, B. A. Soil Aggregate Size Affects Phosphorus Desorption from Highly Weathered Soils and Plant Growth. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 139-146, 2001.
- WEEKS, J. J.; HETTIARACHCHI, G. M. A Review of the Latest in Phosphorus Fertilizer Technology: Possibilities and Pragmatism. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, p. 1300-1313, 2019.
- WEN, Y. L. et al. Long-term fertilization practices alter aluminum fractions and coordinate state in soil colloids. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, p. 2083-2089, 2014.
- WENG, L.; RIEMSDIJK, W. H.; HIEMSTRA, T. Factors controlling phosphate interaction with iron oxides. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, p. 628-635, 2012.
- WITHERS, P. J. A. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, p. 1-13, 2018.
- YANG, X.; CHEN, X.; YANG, X. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. **Soil & Tillage Research**, v. 187, p. 85-91, 2019.

YAO, H. et al. Effects and Mechanisms of Phosphate Activation in Paddy Soil by Phosphorus Activators. **Sustainability**, v. 12, p. 1-15, 2020.

YUAN, M. et al. Soil and crop response to phosphorus and potassium management under conservation tillage. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 2302-2316, 2020.

ZANCANARO, L. **Adubação fosfatada no sulco de semeadura e em superfície**. In: Boletim de Pesquisa 2017/2018 – Fundação MT, nº 18, p. 82-95, 2018.

ZHANG, W. et al. Response of soil Olsen-P to P budget under different long-term fertilization treatments in a fluvo-aquic soil. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, p. 1-11, 2018.

9. APÊNDICES

10.1 EXPERIMENTO 1 - CONSTRUÇÃO DE PERFIL DE P EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

Apêndice 1 - Concentração e quantidades de P exportado pelos grãos de milho, trigo e soja em função da adubação fosfatada na linha de semeadura e a lanço na superfície do solo.

Modo de aplicação	Altura de plantas			Matéria seca da parte aérea	
	Milho	Trigo	Soja ¹	Trigo	Soja ¹
		cm		kg ha ⁻¹	
Lanço	273,5 ± 2,5	71,9 ± 0,5	74,2 ± 1,1	5576,5 ± 172,5	3730,3 ± 90,0
Linha	277,4 ± 2,6	72,7 ± 0,5	75,5 ± 1,2	5903,6 ± 197,5	3909,4 ± 154,3

A ausência de letras indica não ocorrência de diferenciação estatística (p < 0,05). Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Apêndice 2 - Valores de H+Al e Al³⁺ nas amostras de solo coletadas nas quatro coletas, nas camadas 0-10 e 10-20 cm.

Coleta	Camada diagnóstica	Doses de correção - P ₂ O ₅ , kg ha ⁻¹			
		0	65	130	260
H+Al, cmolc dm ⁻³					
1 (05/2017)	0-10 cm*	5,6 ± 0,1	5,6 ± 0,0	5,6 ± 0,0	5,6 ± 0,2
	10-20 cm	10,4 ± 0,6	9,6 ± 0,1	10,1 ± 0,2	16,3 ± 1,5
2 (05/2018)	0-10 cm	4,2 ± 0,3	4,8 ± 0,3	4,8 ± 0,2	5,3 ± 0,4
	10-20 cm	10,3 ± 0,9	9,4 ± 0,9	8,2 ± 0,7	13,7 ± 0,6
3 (05/2019)	0-10 cm	6,3 ± 0,3	6,5 ± 0,3	6,6 ± 0,2	6,8 ± 0,5
	10-20 cm	13,0 ± 1,1	12,6 ± 1,0	11,8 ± 1,1	15,3 ± 0,4
4 (05/2020)	0-10 cm	7,3 ± 0,5	7,1 ± 0,4	7,1 ± 0,3	7,6 ± 0,5
	10-20 cm	14,7 ± 1,1	13,6 ± 1,2	12,0 ± 0,8	16,9 ± 1,9
Al, cmolc dm ⁻³					
1 (05/2017)	0-10 cm*	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0
	10-20 cm	2,5 ± 0,3	3,0 ± 0,2	2,9 ± 0,3	2,5 ± 0,4
2 (05/2018)	0-10 cm	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0
	10-20 cm	1,3 ± 0,3	1,4 ± 0,3	1,0 ± 0,3	2,3 ± 0,2
3 (05/2019)	0-10 cm	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0
	10-20 cm	1,6 ± 0,2	1,5 ± 0,1	1,3 ± 0,2	1,9 ± 0,1
4 (05/2020)	0-10 cm	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,0
	10-20 cm	1,9 ± 0,2	1,4 ± 0,3	1,6 ± 0,3	2,4 ± 0,4

A ausência de letras indica não ocorrência de diferenciação estatística (p < 0,05). Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Apêndice 3 - Mg e K nas amostras de solo coletadas nas quatro coletas, nas camadas 0-10 e 10-20 cm.

Coleta	Camada diagnóstica	Doses de correção - P ₂ O ₅ , kg ha ⁻¹			
		0	65	130	260
Mg, cmolc dm ⁻³					
1 (05/2017)	0-10 cm*	5,5 ± 0,1	5,5 ± 0,2	5,7 ± 0,1	5,3 ± 0,3
	10-20 cm	4,2 ± 0,2	4,0 ± 0,1	3,8 ± 0,1	3,9 ± 0,3
2 (05/2018)	0-10 cm	5,0 ± 0,1	4,9 ± 0,1	5,0 ± 0,1	4,3 ± 0,2
	10-20 cm	4,1 ± 0,2	4,1 ± 0,2	4,4 ± 0,2	3,4 ± 0,2

3 (05/2019)	0-10 cm	4,3 ± 0,1	4,4 ± 0,1	4,4 ± 0,0	4,3 ± 0,1
	10-20 cm	3,9 ± 0,2	3,9 ± 0,1	4,2 ± 0,1	3,6 ± 0,1
4 (05/2020)	0-10 cm	5,3 ± 0,1	5,3 ± 0,1	5,1 ± 0,1	4,8 ± 0,1
	10-20 cm	4,9 ± 0,1	5,2 ± 0,2	5,1 ± 0,2	4,8 ± 0,3
K, mg dm ⁻³					
1 (05/2017)	0-10 cm*	260,8 ± 7,9	257,9 ± 5,5	262,9 ± 5,0	248,0 ± 8,9
	10-20 cm	126,0 ± 8,1	126,6 ± 3,6	127,5 ± 3,7	120,5 ± 7,6
2 (05/2018)	0-10 cm	361,7 ± 11,8	357,2 ± 15,8	354,7 ± 14,0	390,0 ± 15,6
	10-20 cm	140,0 ± 7,7	142,3 ± 8,0	151,0 ± 4,5	151,5 ± 11,7
3 (05/2019)	0-10 cm	390,1 ± 14,3	383,9 ± 18,3	353,9 ± 15,1	331,0 ± 14,4
	10-20 cm	88,9 ± 5,2	100,4 ± 5,6	104,6 ± 5,3	99,7 ± 14,1
4 (05/2020)	0-10 cm	263,2 ± 6,1	258,9 ± 5,9	267,9 ± 5,6	316,7 ± 18,8
	10-20 cm	149,2 ± 2,5	155,3 ± 2,9	156,3 ± 2,7	155,3 ± 7,4

A ausência de letras indica não ocorrência de diferenciação estatística ($p < 0,05$). Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Apêndice 4 - CTC_{pH7} e saturação por bases (V%) nas amostras de solo coletadas nas quatro coletas, nas camadas 0-10 e 10-20 cm.

Coleta	Camada diagnóstica	Doses de correção - P ₂ O ₅ , kg ha ⁻¹			
		0	65	130	260
CTC _{pH7} , cmolc dm ⁻³					
1 (05/2017)	0-10 cm*	20,7 ± 0,2	20,8 ± 0,2	20,8 ± 0,,	20,6 ± 0,2
	10-20 cm	20,5 ± 0,8	19,0 ± 0,4	19,2 ± 0,3	25,6 ± 1,6
2 (05/2018)	0-10 cm	17,8 ± 0,3	18,3 ± 0,3	18,4 ± 0,3	17,4 ± 0,7
	10-20 cm	20,0 ± 0,5	19,2 ± 0,5	18,6 ± 0,4	21,3 ± 0,4
3 (05/2019)	0-10 cm	18,3 ± 0,3	18,8 ± 0,3	18,9 ± 0,2	18,7 ± 0,3
	10-20 cm	22,0 ± 0,7	21,8 ± 0,7	21,5 ± 0,7	23,7 ± 0,3
4 (05/2020)	0-10 cm	20,6 ± 0,5	20,3 ± 0,5	19,8 ± 0,3	20,0 ± 0,6
	10-20 cm	24,8 ± 1,0	24,6 ± 1,1	22,4 ± 0,9	26,7 ± 1,4
Saturação por bases (%)					
1 (05/2017)	0-10 cm*	73,2 ± 0,5	73,1 ± 0,3	73,2 ± 0,3	72,9 ± 1,1
	10-20 cm	49,1 ± 1,5	49,6 ± 0,6	47,5 ± 0,8	36,9 ± 2,8
2 (05/2018)	0-10 cm	76,4 ± 1,5	73,7 ± 1,0	74,2 ± 0,9	69,9 ± 1,3
	10-20 cm	49,6 ± 3,4	52,4 ± 3,6	56,7 ± 2,8	35,8 ± 2,0
3 (05/2019)	0-10 cm	65,6 ± 1,2	65,6 ± 1,3	65,1 ± 0,9	63,6 ± 1,9
	10-20 cm	42,8 ± 3,1	43,5 ± 2,5	46,8 ± 2,9	35,5 ± 1,1
4 (05/2020)	0-10 cm	65,3 ± 1,7	65,5 ± 1,4	64,4 ± 1,1	62,3 ± 1,6
	10-20 cm	42,0 ± 2,3	45,7 ± 2,8	47,5 ± 2,2	37,5 ± 4,0

A ausência de letras indica não ocorrência de diferenciação estatística ($p < 0,05$). Os valores que acompanham os resultados da variável resposta representam o erro padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

10.2 EXPERIMENTO 2 - VARIAÇÃO DO TAMPONAMENTO DE P EM SOLOS DE TEXTURA E NÍVEIS DE FERTILIDADE CONTRASTES

Apêndice 5 - Conteúdos de Fe e Al total, Fe e Al de baixa cristalinidade (BC) e Fe e Al de alta cristalinidade (AC), extraídos dos solos coletados no estado do RS.

Id	Fe-Total	Al-Total	g kg ⁻¹			
			Camada 0-10 cm		Fe-AC	Al-AC
			Fe-BC	Al-BC		
RS1-LB	107,5	92,5	3,0	2,6	104,5	89,8
RS2-LV	128,5	94,5	2,6	2,4	125,9	92,1

RS3-LV	33,4	54,1	2,1	1,7	31,4	52,4
RS4-LV	70,2	62,6	2,5	1,8	67,7	60,8
RS5-LV	151,0	144,0	2,7	1,5	148,3	142,5
RS6-LV	151,0	130,1	2,8	1,4	147,2	128,7
RS7-LV	14,1	29,6	1,8	1,3	12,3	28,3
RS8-CX	95,6	79,3	3,5	1,3	92,1	78,0
RS9-LV	136,5	153,1	2,6	1,2	133,9	151,9
RS10-CX	149,6	105,8	4,2	1,4	105,8	104,4
RS11-PBAC	5,0	14,3	1,4	0,4	3,6	13,9
RS12-TX	8,2	21,9	2,4	0,9	5,8	21,0
RS13-FT	5,2	14,1	1,2	0,3	4,0	13,7
RS14-PV	4,7	12,6	1,1	0,2	3,6	12,5
RS15-PV	6,1	16,1	1,3	0,3	4,8	15,8
RS16-TX	7,07	15,6	1,8	0,3	5,2	15,3
RS17-RL	78,4	41,6	3,4	1,1	75,0	40,4
RS18-LB	96,4	133,8	2,9	2,9	93,5	130,9
RS19-CH	70,1	89,2	3,8	1,8	66,3	87,3
RS20-PV	24,8	41,0	2,7	0,8	22,1	40,2
Camada 10-20 cm						
RS1-LB	111,3	89,7	2,6	2,8	108,7	86,9
RS2-LV	150,6	111,4	2,7	2,5	148,0	108,9
RS3-LV	33,2	52,2	2,1	1,9	31,2	50,3
RS4-LV	80,0	78,1	2,5	2,0	77,4	76,1
RS5-LV	158,6	142,4	2,8	1,6	155,8	140,9
RS6-LV	166,2	131,8	3,1	1,4	163,2	130,5
RS7-LV	15,6	34,7	1,6	1,0	14,1	33,8
RS8-CX	111,8	84,4	3,7	1,3	108,1	83,1
RS9-LV	142,1	164,0	2,6	1,2	139,5	162,9
RS10-CX	149,6	105,4	3,9	1,3	105,4	104,1
RS11-PBAC	4,9	15,2	1,6	0,5	3,3	14,7
RS12-TX	7,8	22,1	2,4	1,1	5,4	21,0
RS13-FT	6,1	15,7	1,2	0,6	4,9	15,0
RS14-PV	4,4	13,1	1,1	0,2	3,3	13,0
RS15-PV	6,2	16,3	1,3	0,3	4,9	15,9
RS16-TX	7,1	15,6	1,8	0,4	5,3	15,
RS17-RL	77,1	58,1	3,6	1,4	73,4	56,7
RS18-LB	92,3	142,5	3,0	2,6	89,3	139,9
RS19-CH	67,8	88,6	4,0	2,2	63,8	86,5
RS20-PV	36,4	80,3	2,7	1,1	33,7	79,2

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Apêndice 6 - Relação entre as doses de P e os teores disponíveis extraídos por M-1 e valores de CTP considerando disponibilidades iniciais nas faixas “muito baixo”, “baixo” e “médio” dentro das classes de argila, para os solos coletados no RS e em SC.

Id	Muito Baixo	Camada 0-10 cm					
		CTP	Baixo	CTP	Médio	CTP	
		kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹		kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹		kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	
RS1	-	-	0,038**x + 3,034	26,3	0,041**x + 2,401	24,4	
RS2	-	-	-	-	0,045**x + 5,840	22,2	
RS3	0,163*x + 0,722	6,1	0,190*x - 3,709	5,3	-	-	
RS4	-	-	-	-	-	-	
RS5	-	-	0,052**x + 4,958	19,2	0,059*x + 4,341	16,9	
RS6	0,041**x + 1,538	24,4	0,042*x + 1,260	23,8	-	-	
RS7	-	-	0,252**x + 7,060	4,0	0,273*x + 5,303	3,7	
RS8	-	-	0,080**x + 9,906	12,5	0,085**x + 9,248	11,8	
RS9	-	-	-	-	0,054**x + 7,360	18,5	
RS10	-	-	0,051**x + 4,132	19,6	0,057**x + 2,507	17,5	
RS11	0,385**x + 4,267	2,6	0,416**x + 0,908	2,4	0,458**x - 3,783	2,2	

RS12	-	-	$0,256^{**}x + 10,701$	3,9	$0,276^{*}x + 8,636$	3,6
RS13	$0,318^{**}x + 4,602$	3,1	$0,329^{**}x + 3,798$	3,0	$0,301^{**}x + 6,356$	3,3
RS14	$0,335^{**}x + 6,504$	3,0	$0,339^{**}x + 6,213$	2,9	$0,291^{*}x + 10,716$	3,4
RS15	$0,407^{**}x + 4,793$	2,4	$0,447^{**}x + 1,732$	2,2	$0,440^{**}x + 2,624$	2,3
RS16	-	-	$0,383^{**}x + 14,323$	2,6	$0,393^{**}x + 13,58$	2,5
RS17	-	-	$0,116^{**}x + 10,442$	8,6	$0,122^{**}x + 9,681$	8,2
RS18	-	-	$0,070^{**}x + 5,580$	14,3	$0,071^{**}x + 5,466$	14,1
RS19	$0,087^{**}x + 4,980$	11,5	$0,090^{**}x + 4,207$	11,1	$0,094^{**}x + 3,016$	10,6
RS20	₍₃₎	-	-	-	-	-
SC1	$0,283^{**}x + 6,487$	3,5	$0,296^{**}x + 5,390$	3,4	$0,291^{**}x + 5,743$	3,436
SC2	$0,131^{**}x + 4,785$	7,6	$0,135^{**}x + 4,352$	7,4	$0,170^{**}x - 0,456$	5,882
SC3	$0,087^{**}x - 0,125$	11,5	$0,100^{**}x - 2,675$	10,0	-	-
SC4	$0,094^{**}x + 4,987$	10,6	$0,091^{**}x + 5,511$	11,0	$0,088^{**}x + 6,316$	11,4
SC5	-	-	-	-	$0,115^{**}x + 26,890$	8,7
SC6	-	-	$0,154^{**}x - 0,390$	6,5	$0,169^{**}x - 2,335$	5,9
SC7	-	-	-	-	$0,170^{**}x + 19,733$	5,9
SC8	$0,145^{**}x + 4,670$	6,9	$0,149^{**}x + 4,246$	6,7	$0,147^{**}x + 4,574$	6,8
SC9	$0,096^{**}x + 3,926$	10,4	$0,101^{**}x + 3,368$	-	$0,129^{**}x + 0,012$	7,8
SC10	-	-	-	-	$0,067^{**}x + 10,169$	14,9
SC11	$0,031^{**}x - 0,327$	32,2	$0,034^{**}x - 3,477$	-	-	-
SC12	$0,037^{**}x + 1,839$	27,0	$0,043^{**}x + 0,707$	23,2	-	-
SC13	$0,049^{**}x + 3,121$	20,4	$0,050^{**}x + 2,995$	20,0	$0,054^{**}x + 2,234$	18,5
SC14	$0,034^{**}x + 2,241$	29,4	$0,037^{**}x + 1,874$	27,0	$0,042^{**}x + 1,244$	23,8
SC15	-	-	-	-	$0,046^{**}x + 6,741$	21,7
SC16	-	-	-	-	-	-
SC17	$0,061^{**}x + 0,939$	16,4	$0,067^{**}x - 0,110$	14,9	$0,067^{**}x - 0,114$	14,9
SC18	-	-	$0,054^{**}x + 3,479$	18,5	$0,062^{**}x + 2,793$	16,1
SC19	$0,199^{**}x + 8,237$	5,0	$0,201^{**}x + 8,093$	5,0	$0,202^{**}x + 7,848$	5,0
SC20	$0,060^{**}x + 5,987$	16,7	$0,060^{**}x + 5,960$	16,7	-	-
SC21	-	-	$0,106^{**}x + 11,938$	9,4	$0,103^{**}x + 12,257$	9,7
Camada 10-20 cm						
		kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹		kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹		kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹
RS1	$0,036^{**}x + 2,134$	27,8	$0,033^{*}x + 2,942$	30,3	$0,033^{*}x + 4,370$	30,3
RS2	$0,036^{**}x + 2,381$	27,8	$0,038^{*}x + 1,817$	26,3	-	-
RS3	$0,140^{*}x + 0,729$	7,1	$0,164x - 3,311$ ns	6,1	-	-
RS4	-	-	$0,051^{**}x + 7,270$	19,6	$0,060^{**}x + 6,742$	16,7
RS5	$0,058^{**}x + 2,070$	17,2	$0,060^{**}x + 1,867$	16,7	-	-
RS6	$0,041^{**}x + 1,036$	24,4	-	-	$0,036^{**}x + 2,070$	27,8
RS7	$0,202^{**}x + 2,986$	5,0	$0,211^{**}x + 2,274$	4,7	$0,258^{*}x - 2,174$	3,9
RS8	$0,068^{**}x + 3,080$	14,7	$0,073^{**}x + 2,376$	13,7	$0,072^{*}x + 2,578$	13,9
RS9	-	-	$0,052^{**}x + 5,185$	19,2	$0,061^{*}x + 3,970$	16,4
RS10	$0,046^{**}x + 1,666$	21,7	$0,048^{**}x + 1,078$	20,8	$0,048^{**}x + 1,149$	20,8
RS11	$0,363^{**}x + 1,866$	2,8	$0,382^{**}x - 0,153$	2,6	$0,400^{*}x - 2,188$	2,5
RS12	$0,241^{**}x + 6,644$	4,1	$0,253^{*}x + 5,363$	3,9	-	-
RS13	$0,259^{**}x + 1,392$	3,9	$0,292^{**}x - 1,278$	3,4	$0,336^{**}x - 5,259$	3,0
RS14	$0,294^{**}x + 3,478$	3,4	$0,300^{**}x + 2,941$	3,3	$0,310^{**}x + 2,048$	3,2
RS15	$0,353^{**}x + 2,706$	2,8	$0,406^{**}x - 1,424$	2,5	$0,407^{**}x - 1,479$	2,4
RS16	$0,375^{**}x + 6,199$	2,7	$0,398^{**}x + 4,536$	2,5	$0,415^{**}x + 3,396$	2,4
RS17	-	-	$0,109^{**}x + 7,274$	9,2	$0,122^{**}x + 5,576$	8,2
RS18	$0,057^{*}x + 1,218$	17,5	$0,071^{**}x - 1,297$	14,1	-	-
RS19	$0,088^{**}x + 1,108$	11,4	$0,093^{**}x - 0,119$	10,7	$0,097^{**}x - 1,082$	10,3
RS20	-	-	-	-	$0,316^{**}x + 25,758$	3,2
SC1	$0,230^{**}x + 2,096$	4,3	$0,243^{**}x + 1,014$	4,1	-	-
SC2	$0,153^{**}x + 0,104$	6,5	$0,178^{**}x - 2,937$	5,6	$0,174^{**}x - 2,379$	-
SC3	$0,071^{**}x - 0,632$	14,1	$0,082^{**}x - 2,869$	12,2	-	-
SC4	$0,097^{**}x + 1,673$	10,3	$0,102^{**}x + 0,795$	9,8	-	-
SC5	$0,107^{**}x + 3,252$	9,3	$0,113^{**}x + 2,505$	8,8	$0,130^{**}x + 0,165$	7,7
SC6	$0,112^{**}x + 0,610$	8,9	$0,141^{**}x - 2,422$	7,1	$0,143^{**}x - 2,889$	7,0
SC7	$0,084^{**}x + 3,344$	11,9	$0,091^{**}x + 2,561$	11,0	$0,103^{**}x + 0,832$	9,7
SC8	$0,114^{**}x + 2,406$	8,8	$0,117^{**}x + 2,063$	8,5	$0,119^{**}x + 1,694$	8,4

SC9	0,101**x + 1,177	9,9	0,122**x - 1,166	8,2	-	-
SC10	0,066**x + 1,801	15,2	0,070**x + 1,037	14,3	0,081**x - 1,322	12,3
SC11	0,029**x - 0,290	34,5	0,030**x - 2,224	33,3	-	-
SC12	0,031**x + 0,494	32,2	0,038**x - 0,828	26,3	-	-
SC13	0,044**x + 0,694	22,7	0,051**x - 0,695	19,6	-	-
SC14	0,031**x + 0,874	32,2	0,024**x + 1,763	41,7	-	-
SC15	-	-	0,039**x + 3,102	25,6	0,057**x + 0,918	17,5
SC16	-	-	0,041**x + 2,899	24,4	0,062**x + 0,496	16,1
SC17	0,059**x - 0,112	16,9	0,068**x - 1,806	14,7	0,074**x - 3,318	13,5
SC18	0,045**x + 0,763	22,2	0,048**x + 0,487	20,8	-	-
SC19	0,148**x + 1,762	6,7	0,148**x + 1,799	6,8	-	-
SC20	0,050**x + 2,575	20,0	0,051**x + 2,515	19,6	0,049**x + 2,739	20,4
SC21	0,110**x + 3,457	9,1	0,114**x + 3,004	8,8	0,130**x + 1,084	7,7

CTP: capacidade tampão de P (CTP-2). ** Significativo a 1% de probabilidade de erro. * Significativo a 5% de probabilidade de erro. ns: não significativo estatisticamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Apêndice 7 - Relações estatísticas entre as doses de P aplicada e os percentuais de P recuperado, bem como o valor de máximo P recuperado (MPR), nos 20 solos coletados no estado do RS.

Id	Equação	R ²	MPR	Equação		R ²	MPR
	-	-	%	-	-	-	%
RS1-LB	$-6(10^{-6})x^2 + 0,0252x + 5,074$	0,95	31,5	$-3(10^{-6})x^2 + 0,016x + 8,513$	0,90	29,8	
RS2-LV	$-5(10^{-6})x^2 + 0,022x + 7,210$	0,97	31,4	$-6(10^{-6})x^2 + 0,025x + 4,246$	0,98	30,3	
RS3-LV	$-5(10^{-5})x^2 + 0,085x + 24,539$	0,85	60,7	$-5(10^{-5})x^2 + 0,093x + 19,365$	0,87	62,6	
RS4-LV	$-5(10^{-5})x^2 + 0,079x + 15,908$	0,77	47,1	$-5(10^{-5})x^2 + 0,083x + 11,448$	0,89	45,9	
RS5-LV	$-3(10^{-5})x^2 + 0,055x + 12,072$	0,96	37,3	$-3(10^{-5})x^2 + 0,044x + 3,730$	0,74	20,0	
RS6-LV	$-6(10^{-6})x^2 + 0,0241x + 9,583$	0,92	33,8	$-6(10^{-6})x^2 + 0,0257x + 9,082$	0,94	36,6	
RS7-LV	$-3(10^{-4})x^2 + 0,1935x + 44,091$	0,87	75,3	$-4(10^{-4})x^2 + 0,2636x + 32,139$	0,90	75,6	
RS8-CX	$-4(10^{-5})x^2 + 0,0712x + 12,752$	0,95	44,4	$-3(10^{-5})x^2 + 0,0587x + 11,046$	0,99	39,8	
RS9-LV	$-6(10^{-6})x^2 + 0,0266x + 10,316$	0,95	39,8	$-5(10^{-6})x^2 + 0,0248x + 8,541$	0,97	39,3	
RS10-CX	$-3(10^{-6})x^2 + 0,0167x + 8,824$	0,98	32,1	$-3(10^{-6})x^2 + 0,0137x + 2,150$	0,84	17,8	
RS11-PBAC	$-1(10^{-4})x^2 + 0,0731x + 80,053$	0,79	93,4	$-8(10^{-4})x^2 + 0,3803x + 52,765$	0,96	98,0	
RS12-TX	$-6(10^{-5})x^2 + 0,1009x + 48,046$	0,76	90,5	$-6(10^{-5})x^2 + 0,092x + 47,499$	0,82	82,8	
RS13-FT	$-2(10^{-4})x^2 + 0,1313x + 64,804$	0,78	86,4	$-2(10^{-4})x^2 + 0,1466x + 50,051$	0,88	76,9	
RS14-PV	$-2(10^{-4})x^2 + 0,1276x + 68,215$	0,69	88,6	$-6(10^{-5})x^2 + 0,0857x + 63,417$	0,85	94,0	
RS15-PV	$-3(10^{-4})x^2 + 0,2213x + 52,917$	0,95	93,7	$-4(10^{-4})x^2 + 0,2787x + 40,140$	0,95	88,9	
RS16-TX	$-9(10^{-5})x^2 + 0,0865x + 67,239$	0,93	88,0	$-4(10^{-4})x^2 + 0,2984x + 42,451$	0,93	98,1	
RS17-RL	$-2(10^{-5})x^2 + 0,0461x + 21,307$	0,95	47,9	$-2(10^{-5})x^2 + 0,0413x + 19,639$	0,94	41,0	
RS18-LB	$-9(10^{-6})x^2 + 0,0274x + 2,134$	0,91	23,0	$-1(10^{-5})x^2 + 0,0346x + 9,278$	0,95	39,2	
RS19-CH	$-6(10^{-6})x^2 + 0,0257x + 16,219$	0,94	29,6	$-8(10^{-6})x^2 + 0,0292x + 14,869$	0,96	41,5	
RS20-PV	-	-	-	-	-	-	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

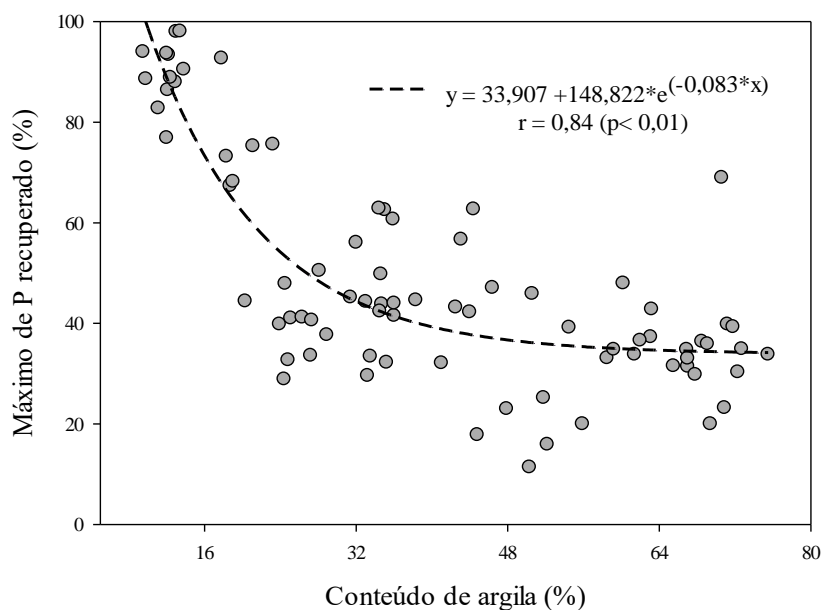
Apêndice 8 - Relações estatísticas entre as doses de P aplicada e os percentuais de P recuperado, bem como o valor de máximo P recuperado, nos 22 solos coletados no estado de SC.

Id	Equação	R ²	MPR	Equação		R ²	MPR
	-	-	%	-	-	-	%
SC1-PVA	$-2(10^{-4})x^2 + 0,1625x + 34,406$	0,75	67,4	$-4(10^{-4})x^2 + 0,279x + 19,528$	0,75	68,2	
SC2-PVA	$-2(10^{-5})x^2 + 0,0412x + 23,938$	0,88	45,2	$-5(10^{-5})x^2 + 0,0831x + 21,618$	0,75	56,1	
SC3-PV	$-1(10^{-5})x^2 + 0,0341x + 12,154$	0,95	41,2	$-1(10^{-5})x^2 + 0,0359x + 8,400$	0,96	40,6	
SC4-PA	$-9(10^{-5})x^2 + 0,0696x + 15,468$	0,91	28,9	$-1(10^{-4})x^2 + 0,0892x + 12,777$	0,93	32,7	
SC5-CX	$-4(10^{-6})x^2 + 0,0084x + 29,224$	0,99	33,6	$-2(10^{-5})x^2 + 0,037x + 20,564$	0,94	37,7	
SC6-CH	$-3(10^{-6})x^2 + 0,0111x + 23,087$	0,62	33,4	$-5(10^{-6})x^2 + 0,0156x + 20,057$	0,68	32,2	
SC7-PVA	$-5(10^{-6})x^2 + 0,0135x + 34,702$	0,92	43,8	$-3(10^{-5})x^2 + 0,0610x + 13,569$	0,97	44,6	

SC8-PVA	$-2(10^{-5})x^2 + 0,0341x + 27,859$	0,70	42,4	$-3(10^{-5})x^2 + 0,0585x + 21,294$	0,86	49,8
SC9-CH	$-6(10^{-6})x^2 + 0,0239x + 20,511$	0,90	44,3	$-8(10^{-6})x^2 + 0,0286x + 18,468$	0,85	44,0
SC10-NV	$-2(10^{-5})x^2 + 0,0576x + 15,194$	0,92	56,7	$-2(10^{-5})x^2 + 0,0653x + 9,362$	0,96	62,7
SC11-NB	$-2(10^{-6})x^2 + 0,0081x + 3,168$	0,98	11,4	$-2(10^{-6})x^2 + 0,0102x + 2,930$	0,96	15,9
SC12-NB	$-5(10^{-6})x^2 + 0,020x + 5,244$	0,99	25,2	$-4(10^{-6})x^2 + 0,0153x + 5,324$	0,97	20,0
SC13-NB	$-5(10^{-6})x^2 + 0,0221x + 8,894$	0,98	33,1	$-4(10^{-6})x^2 + 0,0214x + 6,178$	0,98	34,8
SC14-LB	$-7(10^{-6})x^2 + 0,0293x + 4,749$	0,99	34,8	$-9(10^{-6})x^2 + 0,0336x + 4,510$	0,98	35,9
SC15-LV	$-4(10^{-6})x^2 + 0,020x + 8,0362$	0,97	33,0	$-4(10^{-6})x^2 + 0,0198x + 6,820$	0,96	23,2
SC16 - LV	$-3(10^{-7})x^2 + 0,0076x + 20,847$	0,97	69,0	$-6(10^{-6})x^2 + 0,0254x + 6,891$	0,98	33,8
SC17-CH	$-8(10^{-6})x^2 + 0,032x + 10,227$	0,97	42,2	$-7(10^{-6})x^2 + 0,0318x + 7,065$	0,96	43,2
SC18-LB	$-8(10^{-6})x^2 + 0,0348x + 10,151$	0,98	48,0	$-7(10^{-6})x^2 + 0,0313x + 7,841$	0,98	42,8
SC19-CH	$-7(10^{-5})x^2 + 0,1211x + 40,295$	0,91	92,7	$-6(10^{-5})x^2 + 0,1062x + 26,164$	0,93	73,2
SC20-LV	$-5(10^{-6})x^2 + 0,0209x + 14,589$	0,85	36,4	$-7(10^{-6})x^2 + 0,0266x + 9,666$	0,98	34,9
SC21-CX	$-2(10^{-6})x^2 + 0,0135x + 27,699$	0,79	50,5	$-1(10^{-5})x^2 + 0,0406x + 21,735$	0,96	62,9

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Apêndice 9 - Correlação entre o conteúdo de argila e o valor máximo de P recuperado (MPR), considerando o conjunto de solos coletados nos estados do RS e SC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.