

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA /DEPARTAMENTO DE SOLOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA, RESPOSTA DAS CULTURAS E  
FORMAS DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS EM PLANTIO DIRETO**

MAGNO BATISTA AMORIM  
(Tese)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA /DEPARTAMENTO DE SOLOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA, RESPOSTA DAS CULTURAS E  
FORMAS DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS EM PLANTIO DIRETO**

MAGNO BATISTA AMORIM

Engenheiro Agrônomo (UNIR)

Tese apresentada como um dos  
requisitos à obtenção do Grau de  
Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil  
Abril de 2020

#### CIP - Catalogação na Publicação

Batista Amorim, Magno  
Manejo da adubação fosfatada, resposta das culturas  
e formas de fósforo em Latossolos em plantio direto /  
Magno Batista Amorim. -- 2020.  
118 f.  
Orientador: Cimelio Bayer.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de  
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,  
2020.

1. Manejo da adubação fosfatada. 2. Fontes de P. 3.  
Fracionamento químico de P do solo. 4. Análise de  
caminhos. I. Bayer, Cimelio, orient. II. Título.

MAGNO BATISTA AMORIM  
Engenheiro Agrônomo (UNIR)  
*Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)*

## **TESE**

Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

### **DOCTOR EM CIÊNCIA DO SOLO**

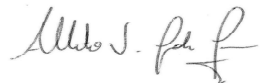
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Faculdade de Agronomia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 29/04/2020  
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 05/08/2020  
Por



CIMÉLIO BAYER  
Orientador-PPG Ciência do Solo



ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR  
Coordenador do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo

TALES TIECHER  
PPG Ciência do Solo  
UFRGS  
(através de videoconferência/skype)

RENAN COSTA BEBER VIEIRA  
UFFS  
(através de videoconferência/skype)



VOLNEI PAULETTI  
PPG Ciência do Solo/UFPR  
(através de videoconferência/Skype)

CARLOS ALBERTO BISSANI  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia

## **OFEREÇO**

A família que constituí nos últimos anos: minha esposa Oliliane Amorim pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos felizes e de dificuldades, e minhas filhas Isabela e Júlia que me mostraram a verdadeira felicidade que se pode sentir e viver.

**DEDICO** a meu avô José Boy (Piuim) “*in memoriam*” pelo exemplo de homem digno e temente a Deus e pelos momentos alegres que proporcionou a nossa família

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, José e Laudicia, pelo Amor e apoio incondicional desde sempre, contribuindo para minha formação de caráter e profissional.

Aos meus irmãos, Debora e Macson Lucas, pelo companheirismo e apoio durante nossa história.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por me conceder a oportunidade de especialização e aperfeiçoamento moral e profissional.

Ao Instituto Federal de Rondônia por proporcionar a oportunidade de aperfeiçoamento profissional.

Ao Prof. Cimelio Bayer, pela orientação, e por compartilhar uma pequena parte do seu conhecimento, experiência de vida e profissional. Pela paciência em compreender minhas limitações e me ajudar a supera-las.

Aos professores, pela transferência de conhecimento, exemplos profissionais, convívio e disponibilidade sempre que solicitados. Em especial ao Prof. Tales Tiecher pelo direcionamento e prestatividade.

A Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária por disponibilizar os experimentos sem os quais não seria possível a realização deste estudo. Em especial a pesquisadora Sandra Fontoura pela oportunidade de aprendizado.

Ao grupo de pesquisa CIMBA.

Aos amigos e colegas Anaí Ottonelli, Andressa Classer, Adriana Cancian, Caroline Jerke, Cristian Gamboa, Lucas Telles, Murilo Veloso, Osmar Pias, Vitor Ambrosini, José Bernardo Borin, Fernando Arnutt, Lucas Zulpo, Marcelo Schmidt e Cicero Ortigara pela recepção e amizade cultivada ao longo do curso.

A todos, não citados aqui, que contribuíram para minha formação científica, moral e profissional. Obrigado.

# MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA, RESPOSTA DAS CULTURAS E FORMAS DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS EM PLANTIO DIRETO <sup>1</sup>

Autor: Magno Batista Amorim

Orientador: Prof. Dr. Cimélio Bayer

## RESUMO

Devido à alta capacidade de adsorção de fósforo (P), a melhoria do manejo da adubação fosfatada pode aumentar a sua eficiência nos Latossolos do Centro-Sul do Paraná. O presente estudo objetivou avaliar a eficiência de fontes de P solúveis (superfosfato triplo-SFT, superfosfato simples-SFS, Yookarin, Shell e Mosaic) e parcialmente solúveis (Yoorin e Bayóvar), em duas estratégias de adubação (cultura e sistema) na obtenção de elevadas produtividades e na correção do P em Latossolos argilosos sob plantio direto ao longo de três anos (3 safras de inverno e 3 de verão). Em adição, ao final do terceiro anos foi avaliado a contribuição das frações orgânicas e inorgânicas de P para as plantas. Os fertilizantes foram aplicados na linha de semeadura, em doses divididas igualmente para as culturas de inverno e de verão (adubação de cultura) e com a dose integral anual aplicada na cultura de inverno (adubação de sistema). Durante três anos foram avaliados a produtividade das culturas, eficiência agrônômica e retorno econômico da adubação. A amostragem do solo foi realizada anualmente de 0-10 e 10-20 cm para avaliação da correção do solo pelo método do P-resina, e no final do 3º ano (0-10 cm) para fracionamento químico sequencial do P no solo. De maneira geral, em Latossolos com teor de P abaixo do nível crítico, nos quais a produtividade das culturas depende do P aplicado via adubação, devem ser utilizados fosfatos solúveis (SFT e SFS) e aplicados a cada cultivo pois garantem maior produtividade do que os fosfatos parcialmente solúveis e adubação de sistema. A eficiência na correção do teor de P no solo não foi afetada pela solubilidade dos fosfatos nem pela estratégia de adubação. Em Latossolos com alta capacidade de suprimento de P (teor acima do NC), a produtividade das culturas foi alta, independente da solubilidade dos fosfatos e da estratégia de adubação. O melhor desempenho dos fosfatos solúveis em solos deficientes em P se deve, possivelmente, ao abastecimento de frações inorgânicas lábeis e de labilidade moderada ( $P_{RTA}$  e  $P_{bic}$ ,  $P_{NaOH0.1}$ ) e frações orgânicas de labilidade moderada ( $P_{NaOH0.1}$ ), enquanto os fosfatos parcialmente solúveis abasteceram principalmente frações de baixa labilidade ( $P_{HCl}$ ). Ao abastecer frações de P lábeis e de labilidade moderada, a adubação com fosfatos solúveis intensificou o suprimento de P às plantas, diminuindo o suprimento por frações orgânicas que passam a atuar como reserva de P no solo.

**Palavras chave:** manejo adubação fosfatada; fontes de P; Análise de caminhos.

<sup>1</sup>Tese de Doutorado em Ciência do Solo – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (118 p.) – abril, 2020.

# MANAGEMENT OF PHOSPHATE FERTILIZATION, CROP RESPONSE AND PHOSPHORUS FORMS IN OXISOLS UNDER NO-TILLAGE <sup>1</sup>

Author: Magno Batista Amorim  
Adviser: Prof. Dr. Cimélio Bayer

## Abstract

Due to high capacity of phosphorus (P) adsorption in Oxisols from Center-South region of Paraná, the improving management of phosphate fertilizers is necessary for a better efficiency of the added P. This study aimed to evaluate the efficiency of soluble and partially soluble P sources and of two fertilization strategies on to obtaining high crop yields and correcting soil P levels in clayey Oxisols under no-tillage system. In addition, P sources were also evaluated regarding its effect on supplying labile and stable organic and inorganic forms of P in soils. Field experiments were conducted, in soils with low, medium and high P level, for three years (3 winter and 3 summer crops). The treatments consisted of the application recommended dose of P (350, 190 and 115 kg ha<sup>-1</sup> of soluble P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> for soils with low, medium and high initial P content, respectively) using soluble (triple superphosphate-SFT, simple superphosphate-SFS, Yookarin, Shell and Mosaic) and partially soluble P sources (Yoorin and Bayóvar), in addition to a control treatment without phosphate fertilization. Fertilizers were applied in the sowing line, divided equally between summer and winter crops (crop fertilization) or the full dose on winter crop (system fertilization). Grain yield and agronomic efficiency of fertilizers and the net economic return of fertilization in winter and summer crops were evaluated. Soil sampling was performed annually in 0-10 and 10-20 cm layers and then analyzed for available P content by resin (P-resin); in addition, samples of 0-10 cm soil layer from the third year were subjected to sequential chemical fractionation of P. In general, in Oxisols with P content lower than NC (low and medium), in which yield crops depends on the P applied via fertilization, soluble phosphates (SFT and SFS) promoted higher crop yields an net income than partially soluble phosphates and/or system fertilization, however solubility and fertilization strategy did not affect the efficiency to correct soil P content. The better performance of soluble phosphates in P-deficient soils was possibly due to the P supply from labile and moderate lability inorganic fractions (P<sub>RTA</sub> and P<sub>ibic</sub>, P<sub>INaOH0.1</sub>) and moderate lability organic fractions (P<sub>ONaOH0.1</sub>), while phosphates partially soluble supplied mainly low lability fractions like P<sub>IHCl</sub>. In Oxisols with high P supply capacity (high P content), the crops showed high yield regardless phosphate solubility and fertilization strategy. When supplying labile and moderately labile P fractions, fertilization with soluble phosphates intensified P supply to plants by these fractions, decreasing the supply from organic fractions, which acted as a soil P reserve.

**Keywords:** Phosphate fertilization; Center-South of Paraná; Path analysis.

<sup>1</sup>Doctoral Thesis in Soil Science – Soil Science Graduate Program, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (118 p.) – april, 2020.



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I – Introdução Geral</b> .....	1
<b>CAPÍTULO II - Referencial Teórico</b> .....	4
1. Fósforo no solo em sistema plantio direto .....	4
2. Sistema de recomendação e manejo de adubação fosfatada em SPD na região Centro-Sul paranaense.....	7
3. Fontes de fósforo e estratégias de adubação fosfatada em SPD.....	9
4. Disponibilidade de P no solo .....	11
<b>CAPÍTULO III - Eficiência de fontes de fósforo na adubação de cultura e de sistema em latossolos subtropicais em plantio direto</b> .....	17
1. Introdução.....	18
2. Material e métodos .....	19
3. Resultados.....	24
4. Discussão .....	38
5. Conclusões .....	48
<b>CAPÍTULO IV - Abastecimento de formas de fósforo em latossolos subtropicais em plantio direto quando da correção com fosfatos de diferente solubilidade</b> .....	50
1. Introdução.....	51
2. Material e métodos .....	53
3. Resultados e discussão .....	56
4. Conclusões .....	70

<b>CAPÍTULO V - Abastecimento de formas de P em latossolo subtropical em SPD com teor alto de P por fosfatos de diferente solubilidade .....</b>	<b>71</b>
1. Introdução.....	72
2. Material e métodos .....	74
3. Resultados e discussão     76	
4. Conclusões.....	85
<b>CAPÍTULO VI - Contribuição das frações P no suprimento de P para as culturas em latossolos em plantio direto com diferentes níveis de P e sob aplicação de fosfatos com diferente solubilidade .....</b>	<b>86</b>
1. Introdução.....	87
2. Material e métodos .....	89
3. Resultados e discussão .....	94
4. Conclusões.....	106
<b>CAPÍTULO 7 - Considerações Finais .....</b>	<b>107</b>
Referências Bibliográficas .....	109

## RELAÇÃO DE TABELAS

- Tabela 1.** Dose média de  $P_2O_5$  indicada para soja, milho, trigo, e cevada sob sistema plantio direto, em diferentes classes de disponibilidade para Latossolos da região Centro-Sul do Paraná. (Adaptado de Fontoura, et al., 2015). ..... 9
- Tabela 2.** Caracterização das fontes de fósforo e doses aplicadas nos experimentos conduzidos em Latossolos brunos com níveis iniciais de P baixo, médio e alto na região Centro-Sul do Paraná. ....21
- Tabela 3.** Implantação dos experimentos e aplicação das doses recomendadas ao longo de três anos. ....21
- Tabela 4.** Valores de comercialização dos produtos (grãos) e dos insumos (fertilizantes) no Estado do Paraná nas safras avaliadas (2014-2018). Fonte (Agrolink, 2019; Conab, 2019). ..... 23
- Tabela 5.** Produtividade de grãos das culturas em Latossolo bruno com teor inicial de fósforo baixo em resposta à aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de cultura e adubação de sistema), na região Centro-Sul do Paraná. .... 26
- Tabela 6.** Produtividade de grãos das culturas em Latossolo bruno com teor inicial de fósforo médio em resposta à aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de cultura e adubação de sistema), na região Centro-Sul do Paraná. .... 27
- Tabela 7.** Produtividade de grãos das culturas em Latossolo bruno com teor inicial de fósforo alto em resposta à aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de cultura e adubação de sistema), na região Centro-Sul do Paraná. .... 28

<b>Tabela 8.</b> Fósforo disponível por RTA no primeiro, segundo e terceiro ano de experimento em Latossolo bruno com teor inicial de P baixo influenciado pela aplicação de fosfatos solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de sistema e adubação de cultura), no Centro-Sul do Paraná. ....	31
<b>Tabela 9.</b> Fósforo disponível por RTA no segundo e terceiro ano de experimento em Latossolo bruno com teor inicial de P médio influenciado pela aplicação de fosfatos solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de sistema e adubação de cultura), no Centro-Sul do Paraná. ....	32
<b>Tabela 10.</b> Fósforo disponível por RTA no segundo e terceiro ano de experimento em Latossolo bruno com teor inicial de P alto influenciado pela aplicação de fosfatos solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de sistema e adubação de cultura), no Centro-Sul do Paraná. ....	33
<b>Tabela 11.</b> Caracterização química inicial dos Latossolos Bruno alumínico (camada 0-10 cm) com teor inicial de P médio e baixo. ....	54
<b>Tabela 12.</b> Caracterização das fontes e doses utilizadas nos solos com teor inicial de P médio e baixo. ....	54
<b>Tabela 13.</b> Análise de agrupamento hierárquico (Ward) dos tratamentos em Latossolo bruno com teor inicial baixo de P. (Cinco grupos nítidos). ....	65
<b>Tabela 14.</b> Análise de agrupamento hierárquico (Ward) dos tratamentos em Latossolo bruno com teor inicial médio de P. (Quatro grupos nítidos). ....	65
<b>Tabela 15.</b> Caracterização das fontes e doses utilizadas e caracterização química inicial do Latossolo Bruno alumínico (Camada 0-10 cm). ....	74

<b>Tabela 16.</b> Análise de agrupamento hierárquico (Ward) dos tratamentos em Latossolo bruno com teor inicial alto de P. ....	82
<b>Tabela 17.</b> Caracterização química inicial da camada 0-20 cm das áreas experimentais sob Latossolo Bruno alumínico com teor inicial de P alto e baixo. ....	90
<b>Tabela 18.</b> Caracterização das fontes de fertilizante fosfatado e doses utilizadas. ....	91
<b>Tabela 19.</b> Balanço do P disponível (RTA) para a camada de 0-20 cm, produção acumulada de grãos e P exportado nos grãos após três anos em dois Latossolos com teor inicial de P baixo e alto, com e sem aplicação de SFT e Bayóvar. ....	96
<b>Tabela 20.</b> Frações de P em dois Latossolos com teor inicial baixo e alto de P disponível, com e sem fertilização com SFT e Bayovar. ....	97

## RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Distribuição do fósforo no solo e extração correspondente na análise de fracionamento de Hedley et al., (1982) modificada por Rheinheimer (2000)... 14
- Figura 2.** Índice de eficiência agronômica (IEA) médio, para produção total de grãos de setes fontes de fósforo e duas estratégias de adubação (Cultura e Sistema) em três Latossolos com níveis de fertilidade baixo (a), médio(b) e alto(c). ..... 35
- Figura 3.** Retorno econômico líquido (REL) médio de duas safras de Inverno (trigo e cevada) e duas de verão (soja) com aplicação e seis fontes de fósforo em duas estratégias de adubação (Cultura e Sistema) em Latossolos brunos com teores inicial de P baixo (a), médio (b) e alto (c). ..... 36
- Figura 4.** Rendimento relativo (RR) para a cultura da soja em função do teor de P disponível por RTA para os três ensaios avaliados na camada de 0-10 cm (A) e 0-20 cm (B)..... 38
- Figura 5.** Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível baixo de P (Campina do Simão – PR) sob aplicação de diferentes fontes de P. .... 58
- Figura 6.** Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível médio de P (Candói – PR) sob aplicação de diferentes fontes de P ..... 59
- Figura 7.** Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível baixo de P (Campina do Simão – PR) sob aplicação de fontes de P solúveis e de moderada solubilidade em duas estratégias de adubação. .... 61

<b>Figura 8.</b> Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível médio de P (Candói – PR) sob aplicação de fontes de P solúveis e de moderada solubilidade em duas estratégias de adubação. ....	62
<b>Figura 9.</b> Análise de componentes principais (PCA) de frações de fósforo inorgânico e orgânico na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível baixo (a) e médio (b) de P sob aplicação de fontes de P solúveis e de moderada solubilidade em duas estratégias de adubação. ....	64
<b>Figura 10.</b> Distribuição de labilidade (a) e fósforo total extraível (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível baixo de P com aplicação de diferentes fontes de P em duas filosofias de adubação. ....	68
<b>Figura 11.</b> Distribuição de labilidade (a) e fósforo total extraível (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível médio de P com aplicação de diferentes fontes de P em duas filosofias de adubação. ....	69
<b>Figura 12.</b> Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível alto de P (Guarapuava – PR) sob aplicação de diferentes fontes de P. ....	78
<b>Figura 13.</b> Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível alto de P (Guarapuava – PR) sob aplicação de fontes de P solúveis e de moderada solubilidade em duas estratégias de adubação. ....	80
<b>Figura 14.</b> Análise de componentes principais (PCA) de frações de fósforo inorgânico e orgânico na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível alto de P sob aplicação de fontes de P solúveis e de moderada solubilidade em duas estratégias de adubação. ....	82

<b>Figura 15.</b> Distribuição de labilidade (a) e fósforo total extraível (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível alto de P com aplicação de diferentes fontes de P em duas filosofias de adubação. ....	84
<b>Figura 16.</b> Relações entres frações inorgânicas e orgânicas de P e suas contribuições para o P absorvido em Latossolos sob SPD sem aplicação de P após três anos de cultivo. ....	99
<b>Figura 17.</b> Relações entre frações inorgânicas e orgânicas de P em um Latossolo sob SPD, com aplicação anual de P na forma de SFT e suas contribuições para o P absorvido pelas plantas com teor inicial baixo (a) e alto (b) de P disponível. ....	102
<b>Figura 18.</b> Relações entre frações inorgânicas e orgânicas de P em um Latossolo sob SPD, com aplicação anual de P na forma de Bayóvar e suas contribuições para o P absorvido pelas plantas com teor inicial baixo (a) e alto (b) de P disponível. ....	105



## **CAPÍTULO I – Introdução Geral**

Os Latossolos subtropicais são usualmente argilosos, profundos, bem drenados e, sob condições naturais, têm alta saturação por alumínio e apresentam alta capacidade de adsorção de fosfato. Na região Centro-Sul do Paraná predomina a classe Latossolo Bruno aluminico (Embrapa, 2016), solo originado de basalto da formação Serra Geral. Devido às altas taxas de intemperismo, esses solos apresentam altos teores de óxidos de ferro e de alumínio na fração argila (Inda Junior et al. 2007), características que reforçam a alta capacidade de sorção química do fosfato e, conseqüentemente, uma dificuldade no manejo e uma baixa eficiência da adubação fosfatada (Novais et al., 2007, Sousa et al., 2010).

A adoção de sistemas conservacionistas de manejo, com destaque para o sistema plantio direto (SPD) vem crescendo no Brasil, e em algumas regiões como o Centro-Sul do Paraná ele é adotado em praticamente a totalidade da área. O SPD apresenta uma série de benefícios quanto a conservação do solo e da água (Sá et al., 2009), da qualidade física, química e biológica do solo (Slam e Reeder, 2014) e, uma maior disponibilidade de fósforo e eficiência dos fertilizantes fosfatados do que sob sistemas convencionais de manejo com aração e gradagem (Ciotta et al., 2002; Fontoura et al., 2015). O revolvimento do solo restrito à linha de semeadura das culturas diminui o contato dos fertilizantes com os colóides do solo, enquanto a manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo contribui para o acúmulo de matéria orgânica no solo, e de formas mais lábeis de P, diminuindo a adsorção e aumentando a disponibilidade de P às plantas (Rheinheimer e Anghinoni, 2001, Rheinheimer et al., 2008).

A adoção de corretos preceitos técnicos no manejo fitotécnico das culturas, adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo e, particularmente, de tecnologias adequadas de manejo da fertilidade do solo desenvolvidas em nível regional, tem possibilitado sensível incremento na produtividade das culturas nas últimas décadas, o que é suportado pelas condições climáticas de radiação solar e chuva altamente favoráveis (Fontoura et al., 2015).

Pesquisa regional foi desenvolvida no período de 2008 a 2013, quando inicialmente foi realizada a calibração de P no solo, definida a camada diagnóstica da fertilidade do solo, e determinados os níveis críticos de P no solo (Vieira et al., 2015). Na sequência, foi realizado um estudo de resposta das culturas à adubação fosfatada e determinado um sistema de adubação de fósforo visando elevadas produtividades das principais culturas (Vieira et al., 2015; Fontoura et al., 2015). Atualmente, os produtores da região de abrangência da Cooperativa Agrária no Centro-Sul do PR dispõem de um sistema de diagnóstico e recomendação de P para o sistema de produção regional em SPD (Fontoura et al., 2015).

Na continuidade, algumas informações quanto ao uso e eficiência de diferentes fontes de P se tornaram necessárias. O uso de fontes parcialmente solúveis como os fosfatos naturais e outros fosfatos menos tradicionais não tem suporte na pesquisa regional e nacional quanto à sua dinâmica no solo e sua eficiência na correção e manutenção dos teores de P no solo em comparação às fontes fosfatadas mais clássicas em uso na região (superfosfatos triplo e simples), bem como quanto ao seu impacto na produtividade das culturas.

No mesmo sentido, devido ao maior retorno econômico e produtivo a estratégia de adubação de cultura é mais adotada, principalmente em cenários de deficiência de P. Porém, espera-se que em algumas situações a adubação de sistema possa ser adotada. Além disso é necessário avaliar o efeito de diferentes fontes de P em solos com disponibilidade variável de P (teores de P abaixo e acima do nível crítico), bem como definir a melhor estratégia de adubação (adubação de cultura ou de sistema) em cada situação de disponibilidade, pois irá auxiliar na adoção de novas tecnologias de produção agrícola que objetivam maior eficiência do uso do P em solos da região.

Dessa forma, a expectativa é que através da condução de experimentos a campo possam ser geradas informações técnicas quanto à adequação do manejo do fósforo visando a obtenção de elevadas produtividades e máxima eficiência do fertilizante fosfatado em lavouras com diferentes níveis de fertilidade em SPD. Nesse sentido, espera-se determinar quando e como devem ser utilizadas fontes solúveis e parcialmente solúveis em cada cenário de disponibilidade. Além disso, espera-se que o fracionamento do fósforo no solo amplie o entendimento de como as diferentes fontes fosfatadas e estratégias de manejo do P contribuem para as frações orgânica e inorgânicas de P no solo, bem como esta interação favorece o aumento da disponibilidade do fósforo da eficiência agronômica dos fertilizantes e do manejo da adubação.

## **CAPÍTULO II - Referencial Teórico**

### **1. Fósforo no solo em sistema plantio direto**

Solos de regiões tropicais e subtropicais, geralmente apresentam avançado grau de intemperismo, com grande parte da fração argila composta por óxidos de Fe e de Al, o que lhes conferem uma alta capacidade de adsorção química do ânion fosfato. Nesse cenário, o solo age como dreno de P competindo com a planta pelo P adicionado (Novais et al., 2007). Como consequência, a eficiência dos fertilizantes fosfatados é normalmente baixa, sendo necessária a aplicação de altas doses do nutriente para suprimento da cultura. No entanto, o aproveitamento do fósforo adicionado pode ser melhorado através do manejo adequado da adubação, utilizando-se estratégias que diminuam o contato do fertilizante com o solo, como aplicação localizada e o não revolvimento do solo após a colheita em sistema SPD (Conte et al., 2003).

A adsorção do P no solo é específica e ocorre principalmente devido a alta afinidade do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  pelo sítio, e o P aplicado adsorve com alta energia e torna-se pouco disponível. Em seguida, o P é adsorvido em sítios de menor energia não específicos, sendo, dessa forma, mais disponíveis. Devido a essas características, em solos que apresentam maior potencial de adsorção do P, como os Latossolos, o manejo do solo passa a ter maior importância no prolongamento da sua labilidade, (Rheinheimer et al., 2008), termo que usamos para designar a disponibilidade do nutriente. Manejos conservacionistas como o SPD podem minimizar o efeito da adsorção do fosfato no solo, pois o não revolvimento do solo, rotação de culturas, manutenção da cobertura vegetal e balanço positivo de carbono favorecem o acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS). Esse acúmulo de matéria orgânica

promove a ocupação parcial dos sítios de sorção de fósforo, contribuindo para a manutenção de níveis mais elevados de disponibilidade de P no solo (Rheinheimer e Anghinoni, 2001; Rheinheimer et al., 2008; Fink et al., 2016). Nesse sentido, Rodrigues et al., (2016) relataram um maior acúmulo de P lábil em Latossolo em SPD em relação ao preparo convencional no cerrado brasileiro. Porém os mesmos autores relataram que 70 a 85% do P adicionado foi convertido a formas moderadamente lábeis e não lábeis associadas a oxihidróxidos de Fe / Al, e não em formas disponíveis às plantas, o que reforça a característica dos Latossolos tropicais de atuarem como fortes drenos de P, o que reforça a importância do manejo da adubação fosfatada nesses solos mesmo em SPD.

A aplicação superficial dos fertilizantes fosfatados em SPD cria uma camada superficial com alta disponibilidade de P, diminuindo a quantidade de solo em contato com o fertilizante aplicado, o que aumenta o suprimento de P às raízes em relação ao preparo convencional (Gatiboni, 2003). Porém, em anos de déficit hídrico a aplicação superficial dos fosfatos pode limitar a absorção de água e nutrientes devido a concentração das raízes nos primeiros centímetros do perfil. A camada superficial do solo em SPD acumula formas inorgânicas e orgânicas de P com diferente labilidade e muitos estudos tem demonstrado que o P se acumula, principalmente, em formas inorgânicas extraídas com NaOH, consideradas de labilidade moderada (Rheinheimer e Anghinoni, 2001; Conte et al., 2003; Kuo et al., 2005; Gatiboni et al., 2007; Gatiboni et al, 2008; Takeda et al., 2009; Vu et al., 2010; Wang et al., 2010, Rodrigues et al., 2016). Porém, em SPD mesmo frações consideradas de menor labilidade podem ser fonte de P para as culturas. Tiecher et al. (2018) relataram que em SPD a maior parte do P disponível, extraído com resina aniônica, foi abastecido por frações inorgânicas moderadamente lábeis, o que pode indicar uma menor energia de ligação entre o fosfato e os colóides do solo. Dessa forma, o P acumulado em formas menos lábeis pode ser redistribuído para frações com menor energia de ligação, o que sugere que em SPD o aproveitamento do P adicionado pode ser maior.

Em SPD, com a ocupação dos sítios de maior preferência pelo P ocupados devido a adubações sucessivas, associado a evolução do sistema e maiores teores de P orgânico em formas solúveis e insolúveis, a “frente de descida” de P, mesmo

que lenta, pode promover aumento dos teores de frações disponíveis de P em subsuperfície (Rheinheimer & Anghinoni, 2003). Nesse cenário, a matéria orgânica é um importante controlador da dinâmica de P no solo, em que o aporte de resíduos e raízes aumenta a proporção de P orgânico (Po) em relação às quantidades totais de P ao longo do perfil (Harrison, 1987). De modo geral, o conteúdo total de Po aumenta quando o manejo favorece o incremento de matéria orgânica e, ou, com a utilização de fertilizantes (Gatiboni et al., 2013). Por sua vez, a diminuição de Po ocorre em sistemas intensivos de cultivo com baixa reposição de P (Tiecher et al., 2018) e/ou com intenso revolvimento do solo como no sistema de preparo convencional (Damodar Reddy et al., 2000). Rheinheimer & Anghinoni (2003) relatam que em solos subtropicais o Po é fonte de P às plantas e deve ser levado em consideração em estudos que envolvem sua dinâmica e biodisponibilidade. Dessa forma, sistemas de manejo que promovam acúmulo de matéria orgânica no solo também contribuem para o aumento de formas mais lábeis de P, com diminuição da adsorção e conseqüente aumento da disponibilidade de P para as plantas (Andrade et al., 2003).

Os solos da região Centro-Sul do Paraná apresentam teores de MOS usualmente superiores a 40 g dm<sup>-3</sup> na camada de 0-20 cm, favorecidos pelas temperaturas amenas, alto teor de argila e elevados teores de óxidos de Fe e Al dos solos (Fontoura et al., 2015). O desenvolvimento da agricultura nas décadas de 60-70 baseada em sistema de preparo convencional (PC) e práticas de manejo que envolvia pousio no inverno, queima da palha de cereais de inverno e monocultura (soja) no verão teve impacto negativo nos teores de MOS e, como conseqüência, degradação química e física dos solos (Fontoura et al., 2015). Por sua vez, a adoção do SPD alterou o panorama da agricultura regional e está promovendo a recuperação dos teores de MOS. A MOS é um componente do solo muito significativo para aumentar a eficiência dos fertilizantes fosfatados, por sua importância na ciclagem de fósforo, reduzindo sua precipitação e adsorção e também favorecendo a solubilização de fosfatos de menor solubilidade (Sousa et al. 2010). Assim sistemas de manejo envolvendo SPD e rotação de culturas que apresentem um balanço positivo de C no solo (adição>perda) podem aumentar a eficiência dos fertilizantes fosfatados aplicados ao solo (Pavinato, 2009). No

entanto, a importância relativa das formas de P inorgânico (Pi) e de Po na disponibilidade de P às culturas em solos em SPD sob diferentes manejos da adubação é pouco compreendida, especialmente nos solos altamente intemperizados das áreas intensamente cultivadas no Brasil (Zamuner et al., 2008, Pavinato, 2009).

## **2. Sistema de recomendação e manejo de adubação fosfatada em SPD na região Centro-Sul paranaense**

Os sistemas de recomendação de adubação existentes no Brasil objetivam o uso eficiente dos fertilizantes fosfatados por meio da adoção de um conjunto de boas práticas que contribuem para a máxima eficiência dos fertilizantes e aproveitamento do P pelas culturas. Porém, muitos dos sistemas de recomendação são baseados em estudos desenvolvidos em sistema de preparo convencional, e as recomendações para o SPD são feitas por adaptações dos sistemas existentes (Sousa e Lobato, 2004; CQFS-RS/SC, 2016). No entanto, a camada diagnóstica, o extrator de P, as faixas de fertilidade, as doses para cada faixa e o manejo da adubação, podem ser diferentes em SPD e, devido às modificações que ocorrem na dinâmica do P em solos conduzidos em SPD, é necessário o desenvolvimento de recomendações técnicas de manejo da adubação específicas para sistemas de rotação de culturas em SPD (Schlindwein e Gianello, 2004; Fontoura et al., 2015).

Os sistemas de recomendação são baseados em uma ou mais das três filosofias/estratégias de adubação: (i) adubação de correção, (ii) adubação de cultura e (iii) adubação de sistema (Leikam et al., 2003; Fontoura et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016). Na adubação de correção o objetivo é aumentar o teor de P no solo até valores acima do nível crítico (classe alta) e mantê-lo acima desse nível através de adubações de manutenção. A adubação de cultura é baseada na resposta da cultura em função do nível do nutriente no solo, preconizando maior rentabilidade a curto prazo e alto retorno (R\$) por kg de P aplicado (Leikam et al., 2003; Mallarino, 2009). Em geral, a adubação de cultura é mais adequada a solos com grande capacidade em reter P em formas menos disponíveis como os Latossolos (Mallarino, 2009). Já a adubação de sistema é recomendável para solos com fertilidade construída sob SPD bem conduzido e de longo prazo, considerando-se

que nessa condição, o solo apresente uma atividade biológica e bioquímica alta, balanço positivo de carbono, alta ciclagem de nutrientes e condições adequadas de qualidade funcional e estrutural (Fontoura et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016). Na adubação de sistema preconiza-se um suprimento contínuo de nutrientes em sincronia com o desenvolvimento das culturas através da ciclagem dos nutrientes presentes na palhada sobre o solo, sendo a adução feita na cultura de maior exigência em P, geralmente na cultura de inverno para a região Centro-Sul do PR (Altmann, 2012; Fontoura et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016).

Para os solos em que o teor de P está acima do nível crítico, as doses de adubação fosfatada são recomendadas apenas para suprir a quantidade do nutriente exportada pelos grãos (solos com classe de disponibilidade Muito Alta) e com um acréscimo de 20% relativo a possíveis perdas (solos com classe de disponibilidade Alta). Dessa forma após correção do solo em SPD, usualmente a adubação é direcionada ao sistema e a disponibilidade do nutriente é mantida através da intensa ciclagem e manutenção do teor de P disponível acima do nível crítico (Fontoura et al., 2015).

A calibração e recomendação de adubação fosfatada na região Centro-Sul do PR foram desenvolvidas entre 2008 e 2013, e são específicos para o SPD. Nesse período, experimentos de calibração e adubação foram conduzidos e avaliados em sete municípios, com safras de soja, milho, cevada e trigo (Vieira, 2014; Fontoura, et al., 2015). Em função da alta capacidade de adsorção de P (100 a 130 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para elevar 1 mg dm<sup>-3</sup> na camada 0-20 cm) (Vieira et al., 2010), a definição das doses de P levou em consideração a resposta em produtividade das culturas (Tabela 1) sempre visando o máximo retorno econômico para solos com teores de P abaixo do nível crítico. Acima do nível crítico, as doses de P foram definidas visando a manutenção dos teores de P no solo. Entretanto, mesmo levando em consideração a resposta das culturas, as doses aplicadas de P promovem aumento dos teores de P no solo e estima-se que aproximadamente três anos são necessários para a elevação dos teores de P no solo para teores acima do nível crítico nos Latossolos da região (Vieira, 2014; Fontoura, et al., 2015).



**Tabela 01.** Dose média de  $P_2O_5$  indicada para soja, milho, trigo, e cevada sob sistema plantio direto, em diferentes classes de disponibilidade para Latossolos da região Centro-Sul do Paraná. (Adaptado de Fontoura, et al., 2015)

Classe de disponibilidade	Culturas			
	Soja	Milho	Trigo	Cevada
	kg ha <sup>-1</sup>			
Baixa <sup>1</sup>	200	170	140	165
Média <sup>1</sup>	90	155	90	100
Alta <sup>2</sup>	65	130	45	50
Muito Alta <sup>3</sup>	55	115	35	40
Expectativa de Rendimento	4.000	14.000	3.500	4.000

<sup>1</sup>Doses de  $P_2O_5$  para rendimento de máxima eficiência econômica. <sup>2</sup>Doses de manutenção de  $P_2O_5$  baseadas na exportação de fósforo acrescidas 20 %. <sup>3</sup>Doses de reposição de  $P_2O_5$  baseadas na exportação de fósforo pelos grãos e na expectativa de rendimento. Para expectativa de rendimento diferente considerar a exportação de 14, 8, 10, e 10 kg  $P_2O_5$  t<sup>-1</sup> de grãos de soja, milho, trigo e cevada respectivamente.

### 3. Fontes de fósforo e estratégias de adubação fosfatada em SPD

Em sistemas de recomendação de adubação, além da dose, outros critérios devem ser considerados visando o manejo adequado e máxima eficiência do fertilizante aplicado, como: a fonte a ser utilizada, o modo de aplicação (lanço x linha) e a estratégia de adubação (cultura x sistema). A adequação das boas práticas agrônômicas, as quais serão dependentes de diversos fatores, possibilitará o alcance de elevadas produtividades e uma máxima eficiência do nutriente aplicado (Sousa et al. 2010). O modo e a estratégia de aplicação mais adequado pode variar para fertilizantes fosfatados com diferentes solubilidades em solos sob SPD.

As fontes de P podem ser classificadas pela sua solubilidade em água e/ou citrato neutro de amônio (CNA) e em ácido cítrico (AC). No Brasil as principais fontes utilizadas são as solúveis, com destaque para os superfosfatos simples (SFS) e triplo (SFT), bem como os fosfatos monoamônio (MAP) e diamônio (DAP) que possuem mais de 90% de solubilidade em CNA + Água (Sousa et al. 2010). As fontes de P parcialmente solúveis correspondem a apenas 5% do P comercializado no Brasil, cuja classificação se enquadram os termofosfatos, fosfatos naturais

reativos. Os termofosfatos apresentam mais de 90% do fósforo total solúvel em AC e, na forma de pó, apresentam índice de eficiência agrônômica equivalente aos fosfatos solúveis em água. Já os fosfatos naturais apresentam baixa solubilidade em AC, sendo utilizados principalmente em manejos de correção do solo em longo prazo, pastagens e em adubação de sistema em solos sob manejo conservacionista (Sousa et al. 2010).

A aplicação de fosfatos naturais (FN) de média e alta reatividade a solos ácidos tropicais degradados contribui favoravelmente no desenvolvimento vegetal e no rendimento das culturas, não apenas pela liberação de P, mas também por seus efeitos no aumento do Ca trocável ( $\text{Ca}^{++}$ ) e na redução da saturação por  $\text{Al}^{+++}$  (Sousa et al. 2010). Além disso, amplia-se a ciclagem de P no sistema uma vez que a palhada remanescente após a colheita tem maior teor de P do que a palhada em sistemas não fertilizados (FAO, 2004).

Olibone & Rosolem (2010) em estudo conduzido em solo ácido de baixa fertilidade, demonstraram que a aplicação em superfície de fosfatos naturais reativos e fosfatos solúveis aumentaram as reservas de P até 40 cm de profundidade num solo em SPD, inclusive de formas não disponíveis como P-ocluído. Por sua vez, Gatiboni et al., (2007) demonstraram que os fosfatos de rocha Gafsa e Arad (reativos) foram fontes eficientes de P em solos com acidez moderada a alta, mas perderam sua eficiência em solo cuja acidez foi corrigida pela calagem. Dessa forma, cada fertilizante interage com o solo de forma particular, e sua eficiência não depende apenas de sua solubilidade e composição química, mas também das características do solo, tais como pH, textura, tipo de argilominerais, teor de matéria orgânica e população microbiana (Novais et al., 2007; Sousa et al., 2010).

Os Latossolos brasileiros atuam como dreno do P aplicado via fertilizante, e geralmente, em curto prazo, frações moderadamente lábeis de P são alteradas em maior proporção (Teles et al., 2017). As alterações nas frações orgânicas e inorgânicas de P no solo são influenciadas pela dose, tipo de solo, forma de aplicação, sistema de cultivo, fonte utilizada e da estratégia de adubação (Rheinheimer & Anghinoni, 2003; Santos et al., 2008). Desta forma a eficiência dos fertilizantes fosfatados é dependente de vários fatores inter-relacionados, e o

entendimento dessas relações é determinante da eficiência da adubação fosfatada em solos tropicais e subtropicais.

#### **4. Disponibilidade de P no solo**

O P é distribuído em compartimentos orgânicos (Po) e inorgânicos (Pi) de diferentes labilidades e sua disponibilidade é resultado da interação dessas frações. Portanto, para entendermos como a disponibilidade de P é afetada pelo tipo de solo, sistema de manejo, fonte e estratégia de adubação, a distribuição do P no solo nos compartimentos Po e Pi de diferentes labilidades deve ser conhecida (Rheinheimer & Anghinoni, 2003; Santos et al., 2008).

A disponibilidade de P depende de dois fatores interligados: a solução do solo, que constitui o fator intensidade (I), e a fase sólida, que armazena o fosfato, lábil ou moderadamente lábil, que abastece a solução, denominado fator quantidade (Q). A cinética de como o primeiro compartimento é abastecido pelo segundo, chamado fator capacidade (C), representa o poder tampão, ou a taxa de recomposição do I pelo Q, a qual é controlada pela energia de ligação do nutriente em Q e pela difusividade para I, ou pelo grau de labilidade (Novais et al., 2007).

No caso do fosfato, quanto maior o valor de Q, menor a energia de ligação aos colóides, pois os sítios de maior afinidade (grau de energia) já estão saturados. Por isso, os métodos de avaliação da fertilidade do solo procuram estimar a porção de Q passível de repor I, para prever a necessidade de suplementação do nutriente (Novais et al., 2007). A eficiência desses métodos depende da forma físico-química em que o nutriente está inserido em Q e do acesso do extrator a essa forma. Admite-se que o fósforo estimado pelo método de extração representa a fração lábil (Santos et al., 2008). De forma geral, uma única extração com Mehlich 1 ou resina trocadora de ânions (RTA) podem ser considerados a melhor indicação da biodisponibilidade de fósforo (Gatiboni et al., 2007).

O extrator Mehlich 1 (M1) é utilizado para determinação da disponibilidade de fósforo na maioria dos solos brasileiros, incluindo nos estados do Sul e a região do cerrado brasileiro (Souza e Lobato, 2004; Fontoura et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016). Porém, o M1 apresenta algumas limitações como a sensibilidade ao poder

tampão do solo, o que sugere que o extrator não extrai todo o P lábil em solos com alto poder tampão (Rogeri et al., 2017). Além disso, em solos submetidos a aplicação de FNs esse método pode superestimar o teor de P devido a se tratar de um método ácido (Silva e Raij, 1999). Dessa forma, a RTA é recomendável para avaliar disponibilidade de P, não sendo afetada pelo poder tampão de fósforo, produzindo resultados mais estáveis, isso porque o processo de extração se assemelha à ação das raízes das plantas, não ocorre perda de força de extração de fósforo em solos com alto teor de argila, além de não provocar dissolução dos FNs (Silva e Raij, 1999). Embora o conceito de P lábil seja de fácil compreensão, sua quantificação pode ser dificultada pelo grande número de fatores que podem influenciar a sua disponibilidade no sistema solo-planta (Novais et al., 2007; Gatiboni et al., 2013), incluindo as características do solo, fatores ambientais, manejo do solo e espécie cultivada (Gatiboni et al., 2013).

As plantas absorvem o P nas formas minerais aniônicas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , formas iônicas mais comuns na solução de solos com pH entre 4,0 a 8,5 (Barber, 1995). Dessa forma, a planta absorve o P da solução do solo e, devido ao equilíbrio entre as fases sólida:líquida, o conteúdo de P na solução é reestabelecido a partir da dessorção e/ou solubilização da fase sólida, bem como pela mineralização da fração orgânica através da microbiota do solo (Gatiboni et al., 2013). Ou seja, a medida que as plantas absorvem o P da solução do solo, a fase sólida precisa repor o P para que a absorção continue ocorrendo. A intensidade da reposição é dependente do poder tampão de P do solo, que irá influenciar o processo de difusão do P, principal mecanismo de suprimento do fosfato às raízes (Barber, 1995).

A adubação modifica a disponibilidade e absorção de P no solo. O P adicionado pelos fertilizantes, dependendo da fonte, pode ser incorporado a formas de maior ou menor labilidade, através da interação com compostos de Fe, Al, Ca ou com a MOS (Raij, 2004). Dessa forma, para entender como a adubação modifica a distribuição e disponibilidade do P no solo, o fracionamento do P permite identificar como se dá o abastecimento de formas orgânicas e inorgânicas de P com diferente labilidade, suas transformações e interações. Dentre os principais métodos, o proposto por Hedley et al. (1982) apresenta como vantagem a obtenção de informações sobre a disponibilidade de P a curto e longo prazo, por meio da

determinação dos teores das frações de P com vários graus de labilidade ou disponibilidade para as plantas, tanto em formas orgânicas quanto inorgânicas. Esse método foi utilizado por diversos pesquisadores para avaliar o efeito de sistemas de manejo de solo sobre a distribuição das formas de P no solo (Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Gatiboni et al., 2007; Tiecher et al., 2012a, 2012b; Rodrigues et al., 2016), além de fontes e modos de aplicação de fertilizantes fosfatados (Conte et al., 2003; Ceretta et al., 2007; Santos et al., 2008), tornando-se uma importante ferramenta para os estudos de distribuição do P no solo.

O fracionamento sequencial de P do solo é capaz de identificar as formas mais estáveis, em ordem crescente de estabilidade no solo, ou decrescente do ponto de vista de labilidade ou de disponibilidade às plantas. O método é composto por uma sequência de extrações e foi adaptado por diversos pesquisadores (Rheinheimer, 2000). As extrações são feitas por resina de troca aniônica (RTA) ( $2,5 \text{ cm}^2$ ) (P inorgânico);  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  à pH 8,5 (P inorgânico e orgânico);  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  (P inorgânico e orgânico);  $\text{HCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  (P inorgânico);  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (P inorgânico e orgânico). Cada extração representa o P ligado com diferentes graus de energia aos componentes do solo (Figura 1), em que: O P extraído por RTA representa o disponível/lábil; o P extraído por  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  ( $P_{\text{bic}}$ ) é composto por formas biologicamente disponíveis de  $P_i$  adsorvidas aos colóides do solo, compostos orgânicos de baixo peso molecular ( $P_o$ ), além de uma pequena quantidade de P microbiano (Hedley et al., 1982; Tiessen e Moir, 1993); a extração com  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  permite a determinação do  $P_i$  fortemente quimiosorvido a óxidos de Fe e Al e  $P_o$  moderadamente lábil associado aos ácidos fúlvicos; e húmicos adsorvidos nas superfícies mineral e no interior dos microagregados, respectivamente (Hedley et al., 1982; Condon et al., 1985; Linnquist et al., 1997). A fração extraída por  $\text{HCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  é composta principalmente por minerais do tipo apatitas (fosfato de Ca) sendo mais influenciada quando ocorre aplicação de FN ao solo (Gatiboni et al., 2007).

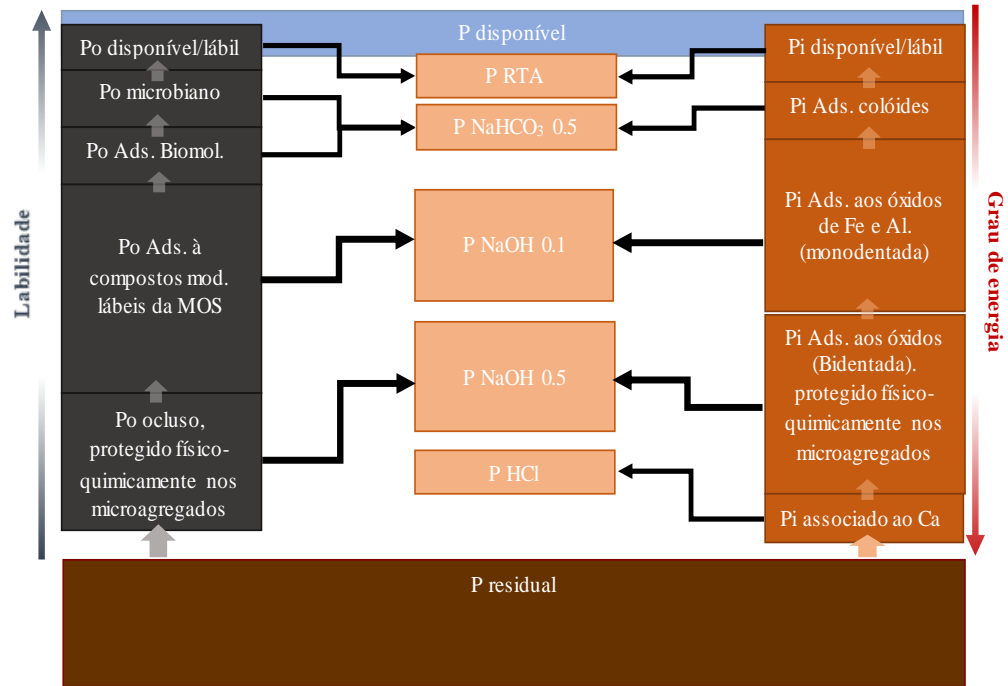


Figura 1. Distribuição do fósforo no solo e extração correspondente na análise de fracionamento de Hedley et al., (1982) modificada por Rheinheimer (2000).

Para os solos tropicais/subtropicais, quando se utiliza o método de Hedley et al. (1982), as maiores proporções de P têm sido observadas nas extrações com NaOH, a qual é uma fração estável no solo devido à forte interação com os óxidos de Fe e Al, caulinita e matéria orgânica (Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Conte et al., 2003). Em solos em SPD essa fração inorgânica de baixa solubilidade também pode contribuir para a disponibilidade de P às culturas (Tiecher et al., 2018). Entretanto, a estrutura de distribuição do P nas diferentes frações e, portanto, a disponibilidade de P nos solos agrícolas é complexa e pode ser influenciada por características do solo, filosofia de adubação, fonte e modo de aplicação, e pela estratégia de manejo da adubação adotada, entre outros fatores. Nesse sentido, o maior conhecimento dessa distribuição e dinâmica do P no solo possibilita o desenvolvimento de estratégias de manejo da adubação que melhorem a disponibilidade e ciclagem de P no solo, contribuindo para a utilização mais eficiente do P do solo e dos fertilizantes, permitindo o alcance de elevadas produtividades das culturas.

## 5. Hipóteses

Em solos em SPD a eficiência da adubação fosfatada está vinculada à fonte e estratégia de adubação adotada, sendo também dependente da disponibilidade de P do solo. Em solos deficientes em P (teor abaixo do nível crítico), a produtividade das culturas depende da aplicação de fontes solúveis de P, a qual deve ser realizada a cada cultivo. Por sua vez, a elevada produtividade das culturas em solos com alta disponibilidade de P (teor acima do nível crítico) independem do suprimento de P via adubação, e a manutenção do teor desse nutriente no solo pode ser realizada com fosfatos solúveis ou parcialmente solúveis, e independe da estratégia de adubação de cultura ou de sistema.

O aumento imediato de formas inorgânicas menos lábeis com a aplicação de fosfatos parcialmente solúveis em solos com alta disponibilidade de P faz com que o P adicionado abasteça formas que atuam como reserva de P no solo. Além disso, a liberação gradual do fosfato natural no solo em SPD diminui a quimiosorção, aumentando o aproveitamento do P aplicado pelas plantas, diminuindo a pressão sobre frações orgânicas reservas de P.

## 6. Objetivos

### 6.1. Geral

Avaliar o impacto de fertilizantes fosfatados solúveis e parcialmente solúveis e da estratégia de adubação na produtividade das culturas e seus reflexos na eficiência e retorno econômico do investimento, bem como verificar como se dá o abastecimento e a inter-relação das frações orgânicas e inorgânicas do P em Latossolos subtropicais com diferentes níveis de fertilidade em SPD.

### 6.2. Específicos

- a) Avaliar a eficiência de fertilizantes fosfatados aplicados em Latossolo Bruno em SPD com diferentes teores de P disponível (abaixo e acima do nível crítico).

- b) Determinar a estratégia de adubação (Sistema ou Cultura) mais eficiente para correção e/ou manutenção da disponibilidade de P em Latossolos em SPD com diferentes teores de P disponível.
- c) Avaliar como fertilizantes fosfatados solúveis e parcialmente solúveis abastecem frações orgânicas e inorgânicas de P e a inter-relação dessas frações no suprimento de P às plantas em Latossolo em ambiente subtropical em SPD.
- d) Verificar o caminho do P a partir do fertilizante, passando pelas frações de P no solo, até a absorção pelas culturas.



## **CAPÍTULO III - Eficiência de fontes de fósforo na adubação de cultura e de sistema em Latossolos subtropicais em plantio direto**

### **Resumo**

A solubilidade e a época de aplicação podem influenciar a eficiência agronômica dos fertilizantes fosfatados, sendo a melhor combinação desses fatores dependente da disponibilidade de P no solo. Neste estudo avaliaram-se cinco fosfatos solúveis (superfosfato triplo-SFT, superfosfato simples-SFS, Yookarin, Shell e Mosaic) e dois parcialmente solúveis (Yoorin e Bayóvar), em duas estratégias de adubação (cultura e sistema), quanto a seu efeito na produtividade das culturas (3 safras de inverno e 3 safras de verão) e na correção ou manutenção do teor de P de Latossolos (ao final do 3º ano) em SPD com teores de P baixo, médio e alto, na região Centro-Sul do Paraná. Doses anuais de 115, 190 e 350 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> foram aplicadas, respectivamente, nos solos com P alto, médio e baixo, as quais foram aplicadas integralmente na cultura de inverno (adubação de sistema) ou divididas igualmente entre a cultura de verão e de inverno (adubação de cultura), além de um tratamento controle, sem adubação fosfatada. Amostras de solo das camadas de 0-10 e 10-20 cm foram coletadas e analisadas quanto ao teor de P-resina. Para os solos com teor de P inicial baixo e médio, as fontes solúveis de P mais comuns (SFT e SFS) determinaram produtividades de 11% a 28% maiores, respectivamente, do que às fontes parcialmente solúveis, sendo observada uma superioridade da adubação de cultura em relação a adubação de sistemas. Em solos com P acima do nível crítico (P alto), todas as fontes de P e ambas estratégias de adubação resultaram em produtividade das culturas similares, indicando suprimento adequado de P para as plantas. Transcorridos três anos de adubação, todas as fontes de P foram eficientes em elevar ou manter os teores de P até teores equivalentes ou acima do nível crítico. Em Latossolos com teor de P abaixo do nível crítico deve-se dar preferência para o uso de fosfatos solúveis aplicados a cada cultivo. Em solos com o P corrigido pode-se utilizar quaisquer fontes de P, podendo-se dar preferência para fontes de menor custo por unidade de P solúvel, cuja aplicação da dose anual pode ser subdividida igualmente e aplicada a cada cultivo ou aplicada integralmente na cultura de inverno.

**Palavras chave:** Fosfato natural, eficiência agronômica, adubação de sistema.

## 1. Introdução

Latossolos são profundos, bem drenados, com mediano a elevado teor de óxidos de ferro e, sob condições naturais, apresentam alta saturação por Al e baixo teor de P disponível (Novais et al., 2007). Para uso agrícola, os Latossolos necessitam de altas doses de fertilizantes fosfatados pois nesses solos o P aplicado via fertilizante usualmente apresenta baixa eficiência devido à alta capacidade de adsorção química do fosfato nas superfícies minerais (Conte et al., 2003; Novais et al., 2007, Sousa et al., 2010).

Estudos de calibração de P na região Centro-Sul do Paraná, desenvolvidos entre 2008 e 2013, determinaram os níveis críticos (NC) de P no solo e as recomendações de adubação fosfatada para as principais culturas em sistema plantio direto (SPD) (Vieira et al., 2015; Fontoura et al., 2015). Nestes estudos estimou-se que em Latossolos deficientes em P o uso de fontes solúveis de P baseado na resposta das culturas por três anos seria eficiente para elevar os teores de P no solo equivalentes ao NC (Fontoura et al., 2015). Por sua vez, em solos com teores de P acima do NC a reposição de P exportado pela colheita de grãos é preconizada visando manter a capacidade de suprimento de P do solo (CQFS-RS/SC, 2016; Fontoura et al., 2015). Entretanto, a correção do solo através da aplicação de doses que visam a resposta das culturas demanda confirmação em estudos específicos, bem como também deve ser avaliada com fontes de P parcialmente solúveis como o termofosfato e fosfatos naturais brasileiros e fosfatos naturais reativos, cuja eficiência é comprometida em solos com pH elevado e alto teor de P disponível (Sousa et al. 2010), além de outros fatores.

Outro aspecto a ser considerado no manejo da adubação fosfatada em SPD é a estratégia de adubação. O P pode ser aplicado a cada cultivo (adubação de cultura) ou numa fase crítica do sistema de produção, e através da reciclagem do nutriente da palhada remanescente da colheita, somado ao nutriente disponível no solo, fornece P para um ou mais cultivos sucessivos (Altmann, 2012; Nicolodi et al., 2017). Tradicionalmente a adubação de cultura é indicada quando os teores de P no solo encontram-se abaixo do NC (Pearse et al., 2007; Rodrigues et al., 2016),

enquanto teores altos de P no solo seriam compatíveis com a adubação de sistema, principalmente quando em sistemas conservacionistas de longo prazo e bem conduzidos (Ceretta et al., 2007). Usualmente, a adubação de sistema consiste na aplicação de P uma única vez ao ano, geralmente na semeadura da cultura de inverno, utilizando a dose integral requerida pelas culturas de inverno e de verão, diminuindo assim os custos operacionais e aumentando a agilidade da semeadura da cultura de verão, sem prejuízos no aproveitamento do P da adubação (Altmann, 2012; Nicolodi et al., 2017).

A nossa hipótese inicial é que no SPD com rotação de culturas há longo prazo, fontes parcialmente solúveis de P e adubação de sistema têm eficiência similar às fontes solúveis e à adubação de cultura em solos com o teor de P acima do nível crítico, e inferior em solos com teores de P abaixo do nível crítico. Nesse sentido, foi conduzido o presente estudo com objetivo de avaliar a eficiência de fontes de P com diferentes solubilidades e de épocas de aplicação, na produtividade das culturas e na correção da disponibilidade de P em Latossolo Bruno com teores de P abaixo e acima do nível crítico de P na região Centro-Sul do Paraná.

## **2. Material e métodos**

### **2.1. Condições edafoclimáticas da região e descrição dos experimentos**

Na região de abrangência da Cooperativa Agrária, no Centro-Sul do Paraná, predominam as classes dos Latossolos Brunos e Nitossolos, normalmente com textura argilosa, e altos teores de óxidos de Fe e de Al (Inda Junior et al., 2007). Tais características determinam alta capacidade de adsorção de P, sendo necessária a aplicação de 100 a 130 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para elevar 1 mg kg<sup>-1</sup> de P na camada de 0-20 cm do solo (Vieira, 2010).

Localizada no terceiro planalto fisiográfico do Paraná, com altitude de 800 a 1200, a Região Centro-Sul do Paraná possui clima subtropical úmido, do tipo Cfb (Köppen). A temperatura média anual é de 17°C, oscilando de 21°C no verão a 13°C no inverno. O volume de chuvas anual é de 1960 mm ano<sup>-1</sup>, com uma boa

distribuição durante o ano, sem estação seca e com geadas frequentes (Vieira, 2014).

Experimentos de campo foram conduzidos em três locais (solos com teores de P baixo, médio e alto) durante três anos (3 safras de inverno e 3 safras de verão), e consistiram na aplicação de sete fontes de fósforo e duas estratégias de adubação (cultura e sistema) em Latossolo Bruno alumínico. Os experimentos foram conduzidos nas localidades de Campina do Simão (teor de P inicial baixo), Candói (teor de P inicial médio) e Guarapuava (teor de P inicial alto), sendo aplicadas doses de 350, 190 e 115 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (solúvel), respectivamente. Essas doses seguem a recomendação regional visando a produtividade de máxima eficiência econômica das culturas (Fontoura et al., 2015). A área do experimento de Campina do Simão apresentava teor baixo de P devido a seu histórico de uso, sendo utilizada nos últimos anos para o cultivo de pinus, sem correção do teor de P. Já a área dos demais experimentos, Candói e Guarapuava, possui histórico de SPD há mais de 20 anos

Dentre as sete fontes de P, foram avaliadas cinco fontes solúveis [superfosfato triplo (SFT), superfosfato simples (SFS), Yookarin, Shell MAPS(Shell) e Mosaic MES (Mosaic)] e duas fontes parcialmente solúveis [Yoorin, Bayóvar]. As características e respectivas doses aplicadas das respectivas fontes são apresentadas na Tabela 2.

Os fosfatos foram aplicados na linha de semeadura, e devido as altas doses de fertilizantes a abertura dos sulcos e a aplicação foi feita de forma manual, empregando duas estratégias de adubação (adubação de cultura e adubação de sistema), além de um tratamento controle, sem aplicação de P. Na estratégia de adubação de cultura, 50% da dose foi aplicada na cultura de inverno e 50% na cultura de verão. Na adubação de sistema, a dose integral foi aplicada na cultura de inverno. Os experimentos seguiram esquema fatorial duplo com tratamento adicional (7 x 2 + 1), distribuídos a campo em delineamento de blocos ao acaso, com três repetições. A instalação de cada experimento e a sequência de adubação são detalhados na Tabela 3.

**Tabela 2. Caracterização das fontes de fósforo e doses aplicadas nos experimentos conduzidos em Latossolos brunos com níveis iniciais de P baixo, médio e alto na região Centro-Sul do Paraná.**

Fonte	Classificação	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solúvel *	Dose aplicada (kg ha <sup>-1</sup> )		
				P Baixo (Campina)	P Médio (Candói)	P Alto (Guarapuava)
Controle	-	-	-	-	-	-
SFT	Solúvel	46%	45%	778	422	256
SFS	Solúvel	20%	19%	1842	1000	605
Yookarin	Solúvel	36%	27%	1296	704	407
Shell	Solúvel	40%	39%	897	487	282
Mosaic	Solúvel	33%	33%	1061	576	333
Yoorin	Parcialmente solúvel	18%	16%	2188	1188	688
Bayóvar	Parcialmente solúvel	29%	14%	2500	1357	786

\* Fontes solúveis (Solubilidade em citrato neutro de amônio + água); Fontes parcialmente solúveis (Solubilidade em ácido cítrico).

**Tabela 3. Implantação dos experimentos e aplicação das doses recomendadas ao longo de três anos.**

Local	Estratégia de adubação	Ano 1		Ano 2		Ano 3		Dose acumulada
		Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	
		av/tr/cv	s	av/tr/cv	s	av/tr/cv	s	
----- kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -----								
Campina (P baixo)	Cultura	175	175	175	175	175	175	1050
	Sistema	350		350		350		1050
Candói (P médio)	Cultura	95	95	95	95	95	95	570
	Sistema	190		190		190		570
Guarapuava (P alto)	Cultura	58	57	58	57	58	57	345
	Sistema	115		115		115		345

av/tr/cv= Aveia branca em Campina do Simão, Trigo em Candói e Cevada em Guarapuava.  
S=soja

## 2.2. Avaliação da produtividade de grãos, eficiência agrônômica e análise econômica das fontes de P

A produtividade de grãos das culturas de inverno e de verão foi avaliada em uma área útil de 20 m<sup>2</sup>, e expressa a 130 g kg<sup>-1</sup> de umidade. O rendimento acumulado foi obtido pela soma dos rendimentos individuais das culturas no período de três anos, através do qual calculou-se o índice de eficiência agrônômica (IEA)

das diferentes fontes de P nas duas estratégias de adubação, conforme a equação 1.

$$IEA(\%) = \frac{\text{Fonte} - \text{Controle}}{\text{SFTc} - \text{Controle}} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

onde: Fonte = Rendimento de grãos acumulado com aplicação da fonte de P em avaliação; Controle = Rendimento de grãos no tratamento controle (sem adubação fosfatada); SFTc = Rendimento de grãos no tratamento com SFT no sistema de adubação de cultura, tratamento (fonte de P e estratégia de adubação) que foi tomado como referência para avaliação das demais combinações de fontes de P e estratégias de adubação.

Para análise econômica foram selecionados 11 cultivos, sendo cinco de inverno e seis de verão (Tabela 4) nos três experimentos. Utilizou-se o critério de duas safras de inverno e duas de verão para cada experimento (nível de P), pois nos experimentos com baixo e médio P foi cultivado aveia branca como cobertura de solo na safra 2015. Além disso, a safra cevada 2017 do experimento em solo com baixo P não foi utilizada devido à baixa produtividade decorrente de fatores climáticos. Assim, para o solo com P inicial alto utilizou-se os dados de produtividade das safras trigo 2014, cevada 2015 e soja 2015/16 e 2016/17; para o solo com P inicial médio utilizou-se as safras cevada 2014, trigo 2016 e soja 2015/16 e 2016/17; e para o solo com P inicial baixo as safras trigo 2016 e soja 2016/17 e 2017/18 (Tabela 4).

O retorno econômico líquido (REL) da adubação fosfatada foi calculado pelo valor da receita da venda do produto (grãos) nos tratamentos com fertilizante subtraído do valor da receita no tratamento sem fertilizante (controle), descontado do custo do fertilizante. O REL foi calculado apenas para as seis fontes de P comerciais, uma vez que o Shell MAPS não é uma fonte comercial e, portanto, não dispõe de valor de mercado. Na Tabela 4 consta os valores do produto (grãos) e dos insumos (fertilizantes) nas diferentes safras para os cálculos da análise econômica.

**Tabela 4. Valores de comercialização dos produtos (grãos) e dos insumos (fertilizantes) no Estado do Paraná nas safras avaliadas (2014-2018). Fonte (Agrolink, 2019; Conab, 2019).**

Cultura	Receita					Custo da fonte	
	Valor de comercialização dos grãos (R\$/sc 60 kg)					Fonte de P	R\$ Mg <sup>-1</sup> *
	2014	2015	2016	2017	2018		
						SFT	1146,54
Soja	59,00	62,00	70,00	61,00	73,00	SFS	756,12
Trigo	29,00	29,00	35,00	29,00	37,00	Yookarin	1874,00
Cevada	32,00	36,00	-	-	-	Mosaic	1510,00
						Yoorin	1275,71
						Bayóvar	701,08

\* Valor fornecido pela Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária – FAPA.

### 2.3. Evolução dos teores de P disponível no solo

O solo foi amostrado antes da implantação para determinação dos teores iniciais de P e seleção de áreas para condução dos experimentos. Durante a sua condução, o solo (0-10 e 10-20 cm) foi amostrado ao final do segundo e terceiro anos nos experimentos de Candói e Guarapuava (solos com teor de P médio e alto, respectivamente), e ao final do primeiro, segundo e terceiro anos no experimento de Campina do Simão (solo com teor de P baixo). As amostras foram secas ao ar, peneiradas em malha de 2 mm, e submetidas a análise de fósforo disponível por resina de esferas ( $P_{RTA}$ ) conforme Rajj et al. (2001).

### 2.4. Nível crítico de $P_{RTA}$ no solo

O nível crítico (NC) de  $P_{RTA}$  no solo foi determinado para as camadas de 0-10 e 0-20 cm. Os teores de  $P_{RTA}$  no solo nas camadas de 0-10 cm e 0-20 cm em maio de 2016 e maio de 2017 foram ajustados em relação ao Rendimento Relativo (RR) da cultura da soja imediatamente anterior à da coleta das amostras de solo (safra 2015/16 para os experimentos de Candói e Guarapuava; e safra 2016/17 para o experimento de Campina do Simão), calculado conforme a equação 2.

$$RR(\%) = \frac{\text{Rendimento do tratamento controle}}{\text{Rendimento de máxima eficiência técnica}} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Os valores de RR e de teor de P no solo foram ajustados à equação de Mitscherlich (Equação 3), previamente utilizada nos estudos de calibração na região (Vieira et al., 2014; Fontoura et al., 2015).

$$y = A(1 - e^{-bx}) \quad (\text{Equação 3})$$

em que  $y$  representa o RR,  $A$  representa a produtividade máxima (100),  $b$  é o coeficiente de eficácia do elemento e  $x$  é o teor de P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) no solo. NC foi considerado o teor de P no solo que determinou um rendimento relativo (RR) de 90% do rendimento máximo.

O valor de NC de  $P_{\text{RTA}}$  determinado visa confirmar a adequação do NC de  $P_{\text{RTA}}$  obtido previamente de forma indireta, onde os teores de  $P_{\text{Mehlich-1}}$  e de  $P_{\text{RTA}}$  de 20 amostras de solo da região com uma grande amplitude de teor de P foram relacionados entre si, e os coeficientes da regressão linear ajustada foram utilizados para calcular o NC de  $P_{\text{RTA}}$  a partir do NC de  $P_{\text{Mehlich-1}}$

## 2.5. Análise estatística

Os resultados de rendimento de grãos das culturas de inverno e de verão e de  $P_{\text{RTA}}$  no solo foram submetidos a análises de variância ao nível de 5% de significância. Quando significativa, a diferença entre médias de tratamentos foi avaliada pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

## 3. Resultados

### 3.1. Resposta das culturas às fontes de P e estratégias de adubação

No solo com teor inicial de P baixo a adubação aumentou a produtividade dos cereais de inverno e da soja (Tabela 5). A produção total acumulada (duas safras) dos cereais de inverno no período aumentou de  $1,8 \text{ Mg ha}^{-1}$  no tratamento sem adubação fosfatada para produção variando de  $4,3$  a  $5,7 \text{ Mg ha}^{-1}$  quando da aplicação de fosfatos solúveis e para rendimentos de  $2,3$  e  $2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$  quando da



aplicação dos fosfatos parcialmente solúveis. Na cultura da soja, a produção acumulada (3 safras), aumentou de 2,5 Mg ha<sup>-1</sup> sem aplicação de P para produção de 9,9 a 11,5 Mg ha<sup>-1</sup> com fosfatos solúveis e superiores a 8,7 Mg ha<sup>-1</sup> com fosfatos parcialmente solúveis.

Com exceção da cevada em 2017, que teve o seu rendimento limitado pela ocorrência de geada/granizo, os cereais de inverno distinguiram mais as fontes de P quanto a solubilidade, tendo incrementado em média 180% a produtividade quando da aplicação das fontes solúveis e em 44% quando da aplicação das fontes parcialmente solúveis, em comparação ao tratamento sem aplicação de P (controle). Por sua vez, a soja respondeu mais expressivamente à aplicação de P com incrementos médios de 312%, não ocorrendo diferença praticamente na resposta do rendimento da cultura quando da aplicação de fontes solúveis (incremento de 328%) e parcialmente solúveis (incremento de 296%).

Dentre os fertilizantes fosfatados solúveis pode-se destacar a maior produtividade acumulada quando da utilização do SFS e do Yookarin, enquanto que a produtividade da soja foi maior também com SFT, além desses dois fertilizantes. Quando visualizada a produtividade acumulada de cereais de inverno e de soja, todos os fosfatos solúveis tiveram desempenho similar, com exceção do Shell que apresentou uma produção acumulada levemente inferior. Dentre os fosfatos parcialmente solúveis, o desempenho do Bayóvar foi bem superior, com produtividade acumulada (soja + cereais de inverno) 27% superior à do Yoorin (Tabela 5). Destaca-se este fosfato natural reativo (Bayóvar) por proporcionar rendimentos de soja similares às fontes solúveis, tanto nas safras individuais quanto no acumulado.

Quanto a estratégia de adubação, a aplicação da dose integral de P na cultura de inverno (adubação de sistema) promoveu pequenos ganhos em produtividade dos cereais de inverno em comparação à adubação de culturas, mas não resultou em prejuízo na produtividade da soja (Tabela 5).

No solo com teor inicial de P médio, o incremento em produtividade com a aplicação de P foi bastante inferior aos verificados no solo com P baixo (Tabela 6), mas manteve-se uma superioridade dos fosfatos solúveis em relação aos parcialmente solúveis, principalmente no caso do Yoorin.

**Tabela 5. Produtividade de grãos das culturas em Latossolo bruno com teor inicial de fósforo baixo em resposta à aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de cultura e adubação de sistema), na região Centro-Sul do Paraná.**

Safr	Cultura	Contr ole.	Estratégia adubação	de		Fontes de fósforo										Aumento de Produtividade	de
				Cultura	Sistema	SFT	SFS	Yookarin	Shell	Mosaic	Yoorin	Bayóvar	Solúveis	Parcialmente solúveis	Parcialme nte solúveis		
15/16	Soja	0,7	3,2	3,0	3,2	A 3,0	A 3,6	A 3,3	A 3,1	A 2,5	B 3,1	A 363	300				
16	Trigo	1,0	3,4	b 3,9	a 3,9	A 4,4	A 4,3	A 4,1	A 4,1	A 2,1	C 2,5	B 316	130				
16/17	Soja	1,0	4,1	3,9	4,8	A 4,1	A 4,4	A 3,6	B 3,6	B 3,0	B 4,3	A 310	265				
17	Cevada	0,8	0,8	0,7	0,4	C 0,9	B 1,4	A 0,8	B 0,9	B 0,2	C 0,4	C 10	-62				
17/18	Soja	0,8	3,6	a 3,3	b 3,5	A 3,8	A 3,8	A 3,1	B 3,2	B 3,2	B 3,7	A 335	331				
Total	Cereais	1,8	4,2	b 4,6	a 4,3	B 5,3	A 5,7	A 4,9	B 5,0	B 2,3	C 2,9	C 180	44				
Total	Soja	2,5	10,9	10,2	11,5	A 10,9	A 11,1	A 10,1	B 9,9	B 8,7	B 11,1	A 328	296				
Total acumulado		4,3	15,1	14,8	15,8	A 16,2	A 16,8	A 15,0	B 14,9	B 11,0	C 14,0	B 266	191				

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas para fontes e minúsculas para estratégias de adubação, dentro de cada safra, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.



**Tabela 7. Produtividade de grãos das culturas em Latossolo bruno com teor inicial de fósforo alto em resposta à aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de cultura e adubação de sistema), na região Centro-Sul do Paraná.**

Safr	Cultura	Estratégia de adubação										Aumento de Produtividade
		Controle	Fontes de fósforo Solúveis					Parcialmente solúveis				
		Cultura	Sistema	SFT	SFS	Yookarin	Shell	Mosaic	Yoorin	Bayóvar	Solúveis	Parcialme
		Mg ha <sup>-1</sup>										%
14	Trigo	5,0	5,7	5,7	5,6	5,7	5,8	5,7	5,6	5,5	14	11
14/15	Soja	5,3	5,2	5,3	5,3	5,2	5,1	5,3	5,2	5,3	-1	-1
15	Cevada	4,4	4,6	4,7	4,6	4,8	4,7	4,8	4,6	4,5	8	3
15/16	Soja	4,6	4,8	4,8	4,8	4,7	4,7	4,9	4,7	4,8	4	3
16	Aveia	5,4	6,3	6,4	6,3	6,3	6,7	6,1	5,9	6,2	18	12
16/17	Soja	5,4	5,7	5,5	5,7	5,6	5,4	5,7	5,7	5,7	3	5
Total	Cereais	14,8	16,6	16,6	16,8	16,9	17,2	16,6	16,1	16,2	14	9
Total	Soja	15,3	15,7	15,6	15,8	15,5	15,2	15,9	15,6	15,8	2	3
Total	acumulado	30,1	32,3	32,2	32,6	32,4	32,4	32,5	31,7	32,0	8	6

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas para fontes e minúsculas para estratégias de adubação, dentro de cada safra, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

Os incrementos médios de produtividade acumulada quando da aplicação dos fosfatos solúveis foram de 35% para os cereais de inverno e de 7% para a soja. Por sua vez, os fosfatos parcialmente solúveis determinaram aumentos menores, 10% para os cereais de inverno e de 3% para a soja (Tabela 6).

Similar ao verificado no solo com P baixo, a aplicação da dose integral de P na cultura de inverno (adubação de sistemas) determinou pequenos incrementos de produtividade da cultura do trigo, mas não resultou em prejuízo na produtividade da soja (Tabela 6).

No solo com teor inicial de P alto não houve efeito da aplicação de P na produtividade das culturas, tanto em cereais de inverno quanto na soja (Tabela 7). Da mesma forma, as fontes de P e a estratégia de adubação também não influenciaram a produtividade das culturas. Porém, a produção média do trigo e aveia branca foi, respectivamente, 13,6 e 15% maior nos tratamentos que receberam fertilizante fosfatado comparado ao controle.

### 3.2. Correção do teor de P do solo

De maneira geral, a correção do teor de P no solo com teor inicial baixo ocorreu apenas na camada superficial do solo (0-10 cm), e foi similar entre as estratégias de adubação e entre as fontes de P com diferente solubilidade (Tabela 8). Em diversas situações (combinações de fonte de P e estratégia de adubação), o fosfato natural Bayóvar destacou-se proporcionando maior teor de P no solo que as demais fontes avaliadas, principalmente quando associado à adubação de sistema (aplicação integral da dose na cultura de inverno).

Considerando apenas no terceiro ano de experimento, verificou-se teores médios de  $P_{RTA}$  superiores a  $70 \text{ mg kg}^{-1}$  na camada de 0-10 cm e em torno de  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  na camada de 10-20 cm. Na média da camada de 0-20 cm, o teor de P no solo foi corrigido de um teor próximo a  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  para um teor em torno de  $40 \text{ mg kg}^{-1}$  (Tabela 8).

No solo com teor inicial de P médio, verificou-se teor de  $P_{RTA}$  de  $18 \text{ mg kg}^{-1}$  na média dos teores verificados no tratamento controle nos dois anos avaliados (primeiro e segundo anos). Similar ao verificado no solo com teor inicial de P baixo,

observou-se nesse solo com maior nível de fertilidade que, de maneira geral, a aplicação superficial dos fertilizantes fosfatados promoveu aumento expressivo do teor de P apenas na camada superficial do solo (0-10 cm). Além disso, salvo algumas exceções, a correção do teor de P no solo praticamente não foi afetada pela estratégia de adubação (Tabela 9).

Considerando os teores médios nos tratamentos com diferentes fertilizantes fosfatados e nas duas estratégias de adubação, o teor de P no solo atingiu valores de 63 mg kg<sup>-1</sup> na camada de 0-10 cm e de 24 mg kg<sup>-1</sup> na camada de 10-20 cm (Tabela 9). Considerando a camada de 0-20 cm, estima-se que teor de P foi corrigido de 18 mg kg<sup>-1</sup> para 42 mg kg<sup>-1</sup> após duas aplicações da dose integral na adubação de sistema, ou da aplicação dos fertilizantes em 4 cultivos na adubação de cultura.

No solo com teor inicial de P alto, transcorridos dois anos, os fertilizantes fosfatados e a estratégia de adubação não influenciaram os teores de P no solo, promovendo a manutenção dos teores iniciais (Tabela 10). Um aspecto bastante importante e que se diferenciou dos demais locais é que neste local com teor inicial de P alto, houve correção deste nutriente na camada subsuperficial (10-20 cm), aumentando de 4 mg kg<sup>-1</sup> de P no primeiro ano do tratamento controle para 24 mg kg<sup>-1</sup> de P no final do segundo ano e na média das fontes de P e estratégias de adubação.

**Tabela 8. Fósforo disponível por RTA no primeiro, segundo e terceiro ano de experimento em Latossolo bruno com teor inicial de P baixo influenciado pela aplicação de fosfatos solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de sistema e adubação de cultura), no Centro-Sul do Paraná.**

Ano	Estratégia de adubação	Camada (cm)	Controle	Fosfatos solúveis				Parcialmente solúveis											
				SFT	SFS	Yookarin	Shel	Mosaic	Yoorin	Bayóvar	Média								
2016	Cultura	0-10	4	17	aB	35	aB	22	aB	15	aB	19	aB	13	bB	60	aA	26	
	Sistema		15	aB	21	bB	18	aB	15	aB	19	aB	19	aB	43	aA	60	aA	27
	<b>Média</b>		16		28		20		15		19		19		28		60		
2017	Cultura	10-20	6	6		7		7		6		7		10		7		7	
	Sistema		7	7	5		8		7		6		6		10		9	7	
	<b>Média</b>		7		6		8		7		6		6		10		8		
2018	Cultura	0-10	2	27	aA	55	aA	37	aA	44	aA	40	aA	21	aA	42	bA	38	
	Sistema		25	aB	30	bB	39	Ba	20	aB	20	aB	32	aB	7	aB	72	aA	32
	<b>Média</b>		26		42		38		32		32		36		14		58		
2017	Cultura	10-20	7	7		8		8		7		7		11		8		8	
	Sistema		8	8	6		9		8		6		6		11		10	8	
	<b>Média</b>		8		7		9		9		9		7		11		9		8
2018	Cultura	0-10	5	65		60		77		72		74		70		172		84	
	Sistema		60		56		50		52		66		66		55		182	74	
	<b>Média</b>		62		58		63		63		62		70		62		177		A
2018	Cultura	10-20	5	7		14		21		11		11		30		37		19 a	
	Sistema		10		5		13		5		9		9		9		25	11 b	
	<b>Média</b>		8		9		17		17		8		10		20		31		A

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas nas linhas comparando fontes e minúsculas nas colunas comparando estratégia de adubação) não diferem entre si (Scott-Knott p<0.05).

**Tabela 9. Fósforo disponível por RTA no segundo e terceiro ano de experimento em Latossolo bruno com teor inicial de P médio influenciado pela aplicação de fosfatos solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de sistema e adubação de cultura), no Centro-Sul do Paraná.**

Ano	Estratégia de adubação	Camada (cm)	Controle	Fosfatos solúveis					Parcialmente solúveis							
				SFT	SFS	Yookarin	Shell	Mosaic	Yoorin	Bayóvar	Média					
2016	Cultura	0-10	25	37	65	39	60	47	60	72	55					
	Sistema			37	44	49	50	39	44	48	44					
	<b>Média</b>			37	55	44	55	43	52	60						
2017	Cultura	10-20	8	6	aA	6	bA	10	aA	11	aA	17	aA	10		
	Sistema			6	aA	6	aA	8	aA	2	bA	7	aA	6	bA	7
	<b>Média</b>			6	8	9	9	9	7	9	9	12				
2017	Cultura	0-10	31	64	aB	57	aB	52	aB	95	aA	55	aB	51	bB	61
	Sistema			59	aB	53	aB	90	aB	53	bB	49	aB	95	Aa	65
	<b>Média</b>			61	55	73	73	55	74	74	51	73				
2017	Cultura	10-20	12	34	46	31	25	28	16	14	28					
	Sistema			43	24	16	15	10	15	21	20					
	<b>Média</b>			39	A	35	A	23	B	19	B	15	B	17	B	

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas nas linhas comparando fontes e minúsculas nas colunas comparando estratégia de adubação) não diferem entre si (Scott-Knott p< 0.05).



**Tabela 10. Fósforo disponível por RTA no segundo e terceiro ano de experimento em Latossolo bruno com teor inicial de P alto influenciado pela aplicação de fosfatos solúveis e parcialmente solúveis e de estratégias de adubação (adubação de sistema e adubação de cultura), no Centro-Sul do Paraná.**

Ano	Estratégia de adubação	Camada	Controle	Fosfatos solúveis				Parcialmente solúveis			
				SFT	SFS	Yookarin	Shel	Mosaic	Yoorin	Bayóvar	Média
2016	Cultura	0-10 cm	42	60	40	48	42	36	59	48	55
	Sistema			50	52	36	48	43	41	52	44
	<b>Média</b>			55	46	42	45	39	50	50	
2016	Cultura	10-20 cm	4	10	7	6	6	9	9	8	10
	Sistema			12	10	6	10	8	7	12	7
	<b>Média</b>			11	9	6	8	9	8	10	
2017	Cultura	0-10 cm	54	75	61	82	60	70	60	80	61
	Sistema			69	71	61	71	71	73	70	65
	<b>Média</b>			72	66	71	66	70	66	75	
2017	Cultura	10-20 cm	22	33	29	30	20	36	24	21	28
	Sistema			27	25	32	41	16	31	26	20
	<b>Média</b>			30	27	31	21	26	28	24	

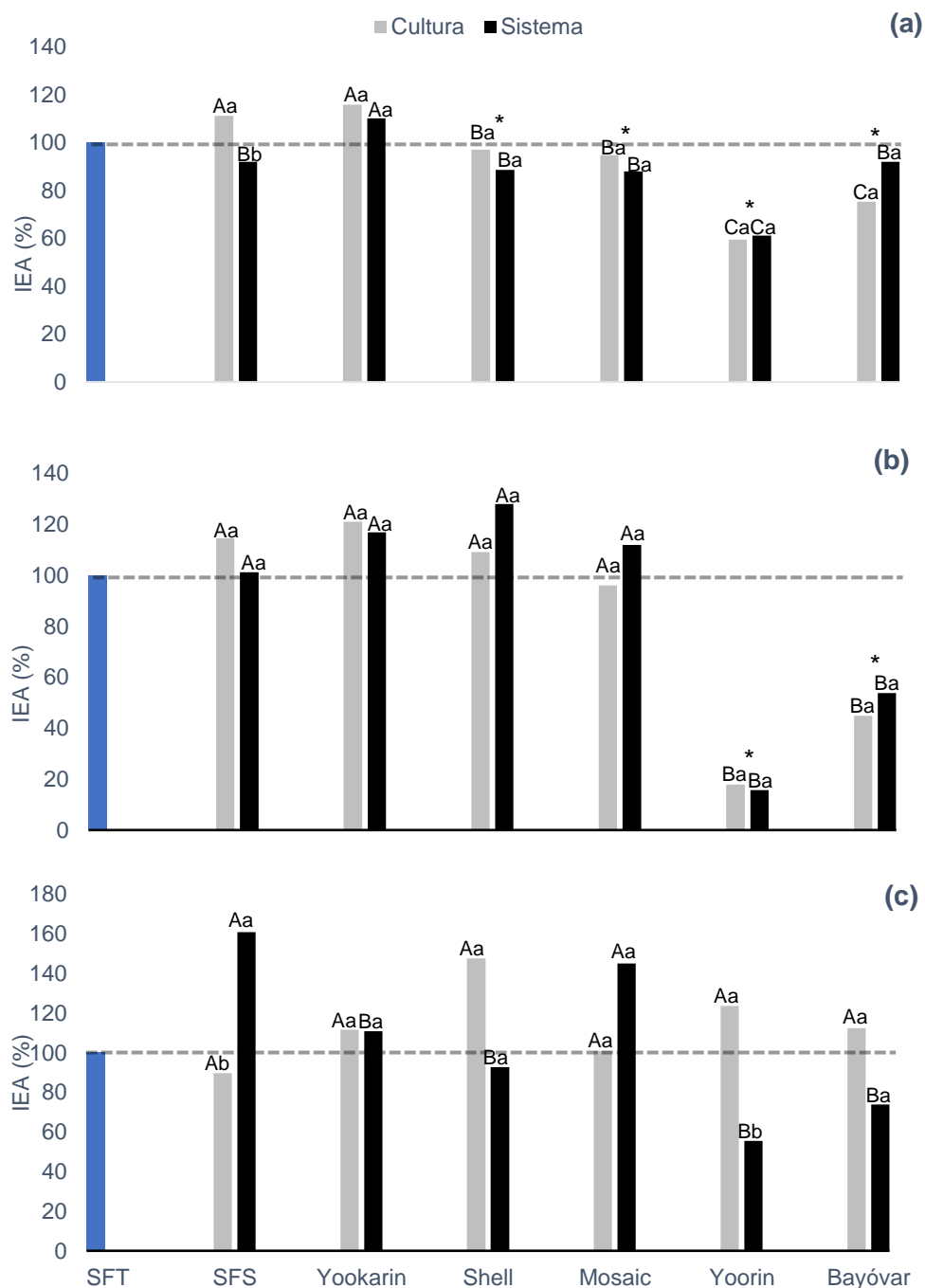
Os fatores fosfatos solúveis e estratégias de adubação não foram significativos a 5% na análise da variância.

### 3.3. Índice de Eficiência Agronômica (IEA) e Retorno Econômico Líquido (REL)

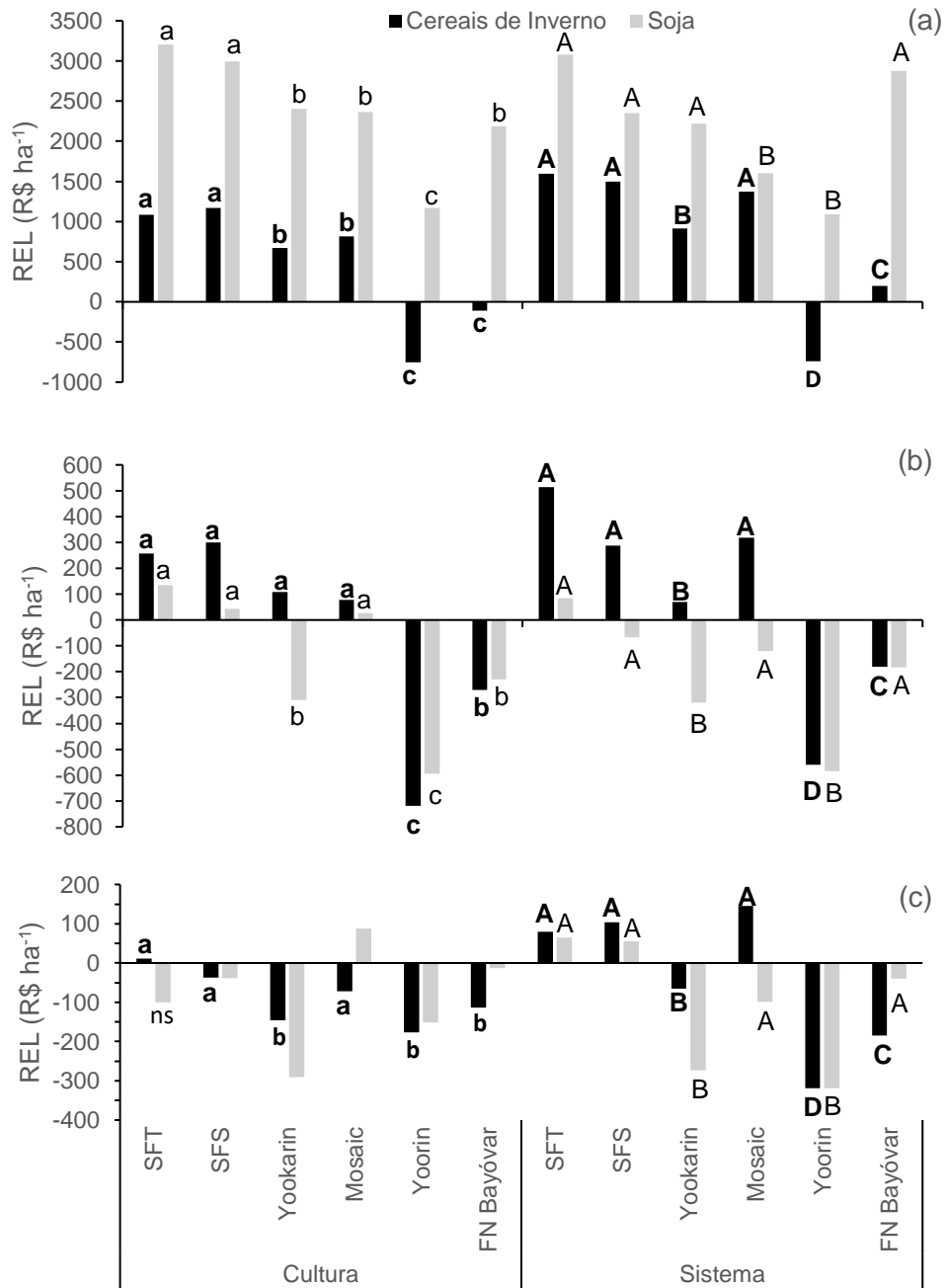
A eficiência agronômica do P aplicado variou em função das fontes de P e da estratégia de adubação utilizada (Figura 2a, 2b e 2c). O IEA médio das fontes solúveis SFS e Yookarin não diferiram ( $p < 0.05$ ) da fonte padrão (SFT) para todas as faixas de disponibilidade de P, abaixo e acima do NC (Figura 2). O IEA médio das fontes solúveis Shell e Mosaic foram menores que do SFT em solo com baixo P (Figura 2a), porém com IEA acima de 90%. Por sua vez, o IEA do Yoorin e Bayóvar foram muito menores aos de fontes solúveis em solos com teor de P baixo e médio (Figura 2a e 2b); já em solo com teor de P alto, o IEA médio das fontes moderadamente solúveis foram iguais às fontes solúveis (Figura 2c).

A estratégia de adubação de cultura aumentou a eficiência agronômica do SFS em solo com baixo P (Figura 2a) e do Yoorin em solo com alto P (Figura 2c). De modo geral, no solo com teor de P baixo, a adubação de cultura melhora a eficiência de fontes solúveis como o SFS, já em solo corrigido (alto P) o IEA do SFS foi menor com a adubação de cultura em relação a estratégia de adubação de sistema (Figura 2c).

Dentre as fontes de solubilidade moderada, o Bayóvar apresentou os maiores IEA, com média de 83%, menor que o SFT, em solo com nível baixo de P (Figura 2a) e IEA igual ao SFT em solo com nível alto de P (Figura 2c). No cenário de alta disponibilidade de P no solo destaca-se a melhora do IEA médio das fontes de moderada solubilidade, com destaque para o Yoorin que aumentou a IEA média de 17%, em solo com nível médio de P (Figura 2b), para 102% em solo corrigido (Figura 2c), não diferindo do SFT.



**Figura 2.** Índice de eficiência agrônômica (IEA) médio, para produção total de grãos de setes fontes de fósforo e duas estratégias de adubação (Cultura e Sistema) em três Latossolos Bruno com níveis de fertilidade baixo (a), médio(b) e alto(c). [Letras iguais acima das barras (letras maiúsculas para fontes de P e minúsculas para as estratégias de adubação) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância. \* IEA médio menor que o da fonte padrão (STF) (Dunnett ao nível de 5% de significância)]



**Figura 3.** Retorno econômico líquido (REL) médio de duas safras de Inverno (trigo e cevada) e duas de verão (soja) com aplicação e seis fontes de fósforo em duas estratégias de adubação (Cultura e Sistema) em Latossolos brunos com teores inicial de P baixo (a), médio (b) e alto (c). [Letras minúsculas comparam as fontes quando da adubação de cultura e maiúsculas quando da adubação de sistema, pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância]

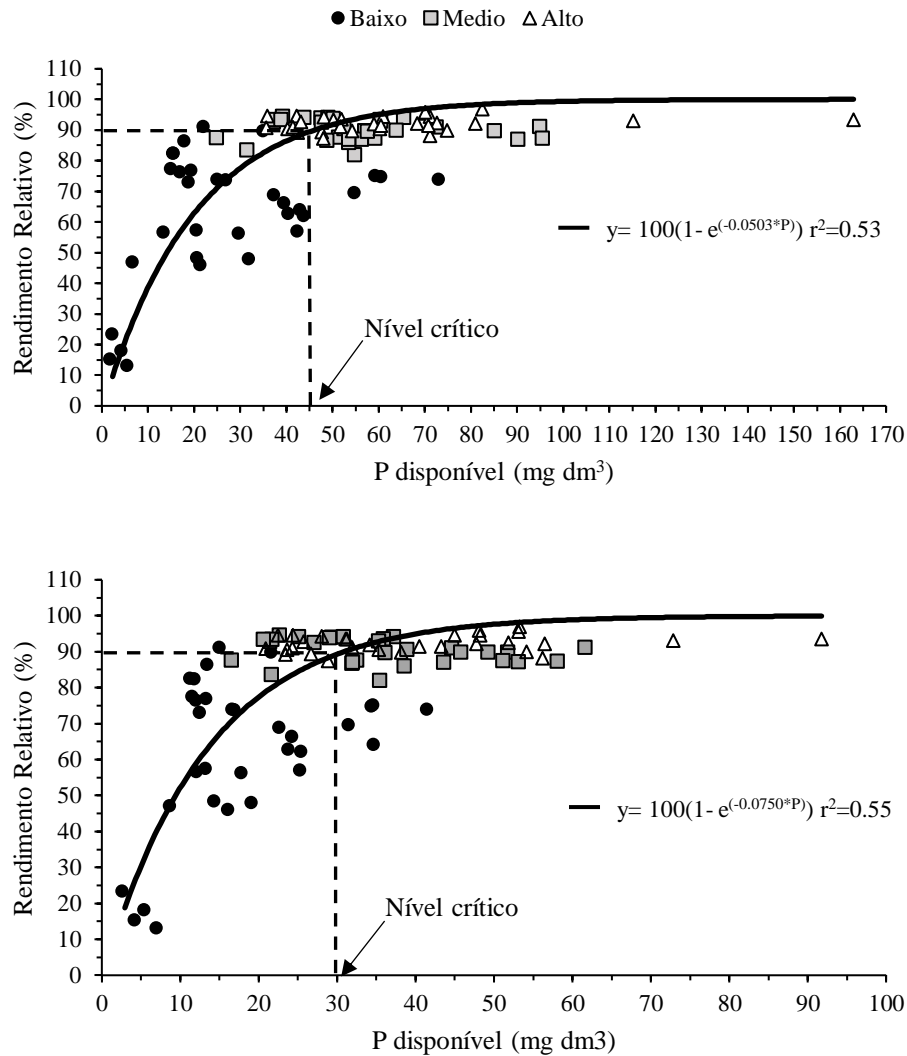
Em relação ao retorno econômico, em solo com baixo P (Figura 3a) os maiores lucros com a adubação foram obtidos com a soja. A aplicação de SFT e SFS proporcionaram os maiores REL em ambas as estratégias de adubação, na média das duas safras de soja, sendo superiores a R\$ 3.000,00 ha<sup>-1</sup> quando do uso do SFT. Além disso, as demais fontes solúveis (Yookarin e Mosaic) também resultaram em altos REL, superiores a R\$ 2.200,00 ha<sup>-1</sup> na cultura da soja, independente da estratégia de adubação.

Os fosfatos parcialmente solúveis Yoorin e Bayóvar proporcionaram REL positivo apenas em solo com ter inicial baixo de P e na cultura da soja (Figura 3a). Porém assim como para o IEA, dentre as fontes menos solúveis, o Bayóvar apresentou os melhores resultados na cultura da soja, com REL de R\$ 2187,00 ha<sup>-1</sup> com adubação de cultura e R\$ 2873,00 ha<sup>-1</sup> com adubação de sistema, não diferendo das fontes solúveis (SFT, SFS e Yookarin) quando da adubação de sistema. Para os demais níveis de P (médio e alto P) a maioria das fontes testadas (solúveis e parcialmente solúveis), proporcionaram REL negativos (Figuras 3b e 2c). Porém, os maiores retornos econômicos se deram quando do uso de fontes solúveis, independente da estratégia de adubação.

Quanto as culturas, em solo com médio P os maiores REL foram observados para nos cereais de inverno quando adubado com fontes solúveis. Em solo alto P os maiores retornos econômicos também se deram nos cereais de inverno adubados com fontes solúveis (SFT, SFS e Mosaic), porem quando associado a estratégia de adubação de sistema.

#### 3.4. Estimativa do teor crítico de P disponível no solo para cultura da soja

O teor crítico de P para a cultura da soja foi estimado em 45 mg dm<sup>-3</sup> e 30 mg dm<sup>-3</sup>, para as camadas 0-10 cm e 0-20 cm, respectivamente (Figura 4). O RR das culturas e o teor de P disponível extraídos por RTA foi bem ajustado pela equação de Mitscherlich com coeficientes de determinação (r<sup>2</sup>) de 0.53 para 0-10 cm e de 0.55 para 0-20 cm (Figura 4ab), indicando que os NC estimados apresentam boa confiabilidade.



**Figura 4.** Rendimento relativo (RR) para a cultura da soja em função do teor de P disponível por RTA para os três ensaios avaliados na camada de 0-10 cm (A) e 0-20 cm (B).

#### 4. Discussão

##### 4.1. Resposta das culturas às fontes de P e estratégias de adubação

Todos os fosfatos aplicados ao solo aumentaram a produtividade das culturas em solos com teor inicial baixo de P (Tabela 5). Porém, em média, as maiores resposta a adubação foram observadas quando do uso de fontes solúveis, tanto para os cereais de inverno, quanto para a soja. Em solos

deficientes em P as plantas são muito dependentes do P fornecido pelo fertilizante, dessa forma, a liberação imediata permite o rápido abastecimento dos sítios de adsorção do fosfato e ao mesmo tempo fornece P as plantas. Nesse sentido o P é disponibilizado às plantas num menor prazo do que as fontes parcialmente solúveis (Pearse et al., 2007; Rodrigues et al., 2016; Soltangheisi et al., 2018). Assim, em solos deficientes em P a correção da disponibilidade deve ser feita por fosfatos solúveis, uma vez que, corrigem a disponibilidade e P e proporcionam altas produtividades dos cereais de inverno e da soja.

Dentre as fontes parcialmente solúveis, o termofosfato Yoorin mostrou-se menos eficiente no suprimento de P as plantas em solo com alta deficiência deste nutriente. Porém, a eficiência do Yoorin aumenta à medida que o teor de P no solo é corrigido, uma vez que, não foi observada diferença de produtividade em relação às fontes solúveis, em solo com alto P (Tabela 7). Em alguns estudos os termofosfatos, como o Yoorin, apresentaram eficiência equivalente ao dos fosfatos solúveis (Souza et al., 2010; Silva, 2014), o que não foi observado nesse estudo para o solo com teor inicial baixo de P. Dessa forma, o Yoorin não deve ser utilizado para correção da disponibilidade de P em solos da região.

Por outro lado, a aplicação do fosfato natural Bayóvar resultou em produtividades de soja semelhantes às fontes solúveis. Apenas para o cereal de inverno (trigo 2016) a produtividade foi menor que a dos fosfatos solúveis. Portanto, a liberação gradual de P do fosfato natural (FN) não prejudicou o fornecimento de P à cultura da soja. Se considerarmos todo o P aplicado na forma de Bayóvar a maior parte da dose é aplicada no inverno (100% sistema + 50% cultura), que corresponde a 75% do P aplicado como FN, a liberação gradual favorece a cultura de verão, pois o P aplicado no inverno só estaria disponível no verão. Esse efeito pode ser observado quando analisamos a produção total da soja, em que, o Bayóvar apresentou produção acumulada superior a  $11 \text{ t ha}^{-1}$ , não diferindo dos fosfatos solúveis SFT, SFS e Yookarin, o que não foi observado para os cereais de inverno. Devido a esse efeito residual os fosfatos naturais são recomendados principalmente em manejos de correção do solo à longo prazo e em adubações de sistema em manejos conservacionistas em solos já corrigidos (Souza et al. 2010).

Quanto a estratégia de adubação, em solo com teor inicial baixo de P (Tabela 5), os resultados demonstram efeitos distintos para os cereais de inverno

e para a soja. O trigo na safra 2016 produziu mais quando a dose foi aplicada toda no inverno e já soja 2017/2018 apresentou maior produtividade quando a dose foi aplicada em cada cultura, mas somente após a terceira dose corretiva. Dessa forma, durante a correção da disponibilidade de P a cultura de inverno foi favorecida pela adubação de sistema devido ao aumento da dose de P em solo com baixa disponibilidade deste nutriente. Porém, considerando a produtividade acumulada de todas as safras avaliadas, as estratégias de adubação não diferem entre si.

Já em solo com teor inicial médio de P, a produtividade de nenhuma das três safras de soja foi afetada pela fonte e estratégia de adubação (Tabela 5). Além disso, a produtividade da soja foi muito semelhante entre o tratamento controle (4,8, 5,2 e 5,0 Mg ha<sup>-1</sup>) e as médias dos tratamentos com aplicação de P (4,9, 5,5 e 5,3 Mg ha<sup>-1</sup>), nas safras 2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017, respectivamente. A região Centro Sul do Paraná apresenta distribuição uniforme de precipitação e bom regime hídrico durante o verão. O que associado a altas temperaturas, durante o cultivo da soja, favorece a difusão do íon fosfato, diminuindo o efeito da adubação sobre as culturas de verão. Resultados semelhantes foram relatados em estudos conduzidos em solos da região por Lantmann et al. (1996) e Vieira et al. (2015), em que, as culturas de verão (soja e milho) apresentaram menor exigência em P do que culturas de inverno (aveia, trigo e cevada). Vieira et al. (2015) relacionaram essa maior disponibilidade de P e menor resposta das culturas de verão à menor temperatura e disponibilidade hídrica nos meses de inverno. Devido a resultados desta natureza, usualmente, a maior resposta das culturas de inverno à adubação fosfatada tem determinado que estas culturas sejam tomadas como referência na definição do nível crítico de P no solo na região (Vieira et al., 2015).

Em solo com teor inicial médio de P a adubação de sistema (aplicar todo o P requerido para as culturas de verão e de inverno em uma única vez na semeadura da cultura de inverno), resultou em aumento médio de produtividade de 9.1 e 3.6% para a cultura da cevada e do trigo, respectivamente (Tabela 6). Dessa forma, a maior disponibilidade de P em solo com teor médio de P, permite uma única aplicação anual na cultura de inverno, que se mostrou mais responsiva, não prejudicando o aproveitamento do P da adubação pelas culturas de verão (Altmann, 2012; Caires et al., 2017). Porém, os benefícios associados



a adubação de sistema sobre as culturas de inverno podem ser maiores quando do uso de fosfatos solúveis, uma vez que, proporcionaram o maior aumento (35%) na produção acumulada das culturas de inverno.

A partir da correção da disponibilidade de P em SPD, altas produtividades foram alcançadas pela adubação de manutenção, independente da fonte e estratégia de adubação adotada. Isso se deve, pelo menos em parte, pela adoção de um sistema conservacionista como o SPD, que permite a construção da fertilidade, o desenvolvimento da estrutura e do perfil do solo e, conseqüentemente, uma melhor ciclagem e aproveitamento do P aplicado. Além disso, o maior aporte de resíduos vegetais manteve o solo coberto o que favorece o acúmulo de P no solo em diversas frações e aumenta a disponibilidade de água, facilitando os processos de difusão essenciais na absorção do P (Rheinheimer & Anghinoni, 2003; Bortolon et al. 2016). Os resultados corroboram com estudos que destacam o efeito residual do P quando aplicado toda dose na cultura de inverno em SPD, pois a adubação proporcionou efeito positivo para a cultura da soja, mesmo com a adubação de sistema com fontes menos solúveis (Corrêa et al., 2004, Franzini et al., 2009, Olibone e Rosolem, 2010). Isso se deve principalmente, a rápida ciclagem de P quando do uso de fontes solúveis, liberação gradual de P no solo com o uso de fontes menos solúveis e a rápida ciclagem dos nutrientes dos resíduos em SPD (Caires et al., 2017).

#### 4.2. Correção do teor de P dos solos

As fontes solúveis apresentaram efeito similar nos teores de P no solo em ambas estratégias de adubação. Porém, mesmo com duas doses de 350 kg ha<sup>-1</sup> em todos os tratamentos com fertilizantes solúveis, o P se manteve abaixo do nível crítico para a camada 0-10 cm de solo (45 mg dm<sup>-3</sup>), o que era esperado considerando que a expectativa é que o nível crítico seja alcançado apenas após três doses (Fontoura et al., 2015).

Com duas aplicações de 350 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, dentre as fontes solúveis, a disponibilidade de P (P<sub>RTA</sub>) foi maior quando do uso do SFS associado a estratégia de adubação de Cultura (Tabela 8). Dessa forma, durante a correção da disponibilidade, fontes solúveis como o SFS apresentam eficiência corretiva

maior quando são aplicadas em cada cultivo. Porém, com o aumento da disponibilidade de P o efeito da estratégia de adubação diminui dentro do manejo da adubação, pois com a aplicação da terceira dose, todos os tratamentos corrigiram o P disponível acima do NC ( $45 \text{ mg dm}^{-3}$ ), como sugerido por Fontoura et al. (2015), independente da estratégia de adubação, indicando que após a correção da disponibilidade, todas as fontes e estratégias de adubação podem ser adotadas. Dessa forma, o manejo da adubação em SPD pode ser flexibilizado, pois a opção pela a adubação de sistema representa um importante ganho prático, uma vez que uma aplicação por ano otimiza a operacionalidade da lavoura, diminuindo custos sem prejuízo a produtividade das culturas em rotação (Altmann, 2012, Caires et al., 2017).

Em solo com teor inicial baixo de P, o Bayóvar corrigiu a deficiência de P do solo com desempenho superior às fontes solúveis em ambas as estratégias de adubação, no primeiro ano de adubação. Além disso, como observado no item 6.3.1, a produtividade da soja 2015/16 (Tabela 5) não foi diferente entre os tratamentos com Bayóvar e as fontes solúveis, o que indica que a disponibilidade para a soja do P aplicado como FN foi semelhante as fontes solúveis de alto valor agrônômico. Por outro lado, no primeiro ano, a estratégia de adubação de sistema com o fertilizante Yoorin proporcionou maior teor de  $P_{RTA}$  (Tabela 8), mas a produtividade da soja na safra 2015/16 com esta fonte foi menor que as demais (Tabela 5). Dessa forma, mesmo proporcionando alto teor de  $P_{RTA}$  o tratamento com Yoorin não apresentou resposta produtiva, e o resultado não se manteve no segundo ano (2017), indicando que em solo muito deficiente o efeito corretivo do Yoorin é menor que o das demais fontes utilizadas nesse estudo.

Em solo com teor inicial baixo de P a adubação de sistema aumentou a capacidade corretiva do Bayóvar após a segunda aplicação (Tabela 8). Quando a dose foi aplicada toda no inverno (sistema) o Bayóvar proporcionou os maiores teores de  $P_{RTA}$  no solo no segundo ano (2017). A liberação lenta do P do FN diminui o efeito de sorção do fosfato (Rodrigues et al., 2016), o que pode explicar o efeito corretivo observado nos dois primeiros anos. Além disso, com o aumento da disponibilidade de P em solos conduzidos em sistemas conservacionistas como o SPD, esperam-se efeitos significativos da adubação de sistema na disponibilidade de P. Nesse cenário a ciclagem de nutrientes favorece o aporte contínuo de nutrientes, o que pode melhorar a eficiência do P aplicado, como

observado para a fonte Bayóvar (Sousa et al. 2010; Fontoura et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016).

A análise conjunta dos resultados em solo com baixo P para os três anos nos indica que a correção da deficiência de P evoluiu conforme preconizado por Fontoura et al. (2015), porém, o efeito maior de correção ocorreu na camada superficial do solo (0-10 cm) (Tabela 8). Para a camada 10-20 cm, apenas o FN Bayóvar apresentou teor médio de  $P_{RTA}$  superior às fontes solúveis SFT e SFS, indicando um início de descida desse fertilizante após três anos. Esses resultados são esperados devido à grande capacidade dos Latossolos da região em adsorver o fosfato aplicado (Inda Junior et al., 2007), restringindo sua distribuição para camadas mais profundas. Resultados semelhantes foram relatados por Santos et al. (2008), em que a redistribuição do P aplicado foi até 10 cm de profundidade, com grande gradiente no sentido vertical. O mesmo está ocorrendo nesse estudo, pois após a aplicação da terceira dose, para todas as fontes utilizadas no ensaio, observa-se apenas uma tendência de aumento nos teores de  $P_{RTA}$  na camada de 10-20 cm.

Em solo com teor de P médio, após a aplicação da segunda dose (2º ano) o  $P_{RTA}$  na camada de 0-10 cm foi similar para todas as fontes de P utilizadas (Tabela 8). Porém, verificou-se efeito da estratégia de adubação na camada subsuperficial (10-20 cm), em que o Bayóvar e Mosaic proporcionaram uma melhor correção quando da adubação de cultura e o Yookarin quando a dose foi aplicada toda no inverno (sistema). No entanto, apesar do efeito da estratégia de adubação para algumas fontes, os tratamentos com adubação apresentaram pouco efeito sobre o teor de P em relação a testemunha, com 8 mg dm<sup>3</sup> em média para as fontes solúveis, e 10.5 mg dm<sup>-3</sup> para as fontes de baixa solubilidade. Dessa forma, em solo com maior disponibilidade de P (médio P) apesar de lenta, a descida dos fertilizantes pode ser favorecida, uma vez que, os sítios que adsorvem os fosfatos vão sendo ocupados gradativamente e permitem que o P aplicado se movimente em profundidade. Além disso, solos tropicais com altos teores de argila, favorece a solubilização gradual dos fosfatos naturais limitando a adsorção específica pelos óxidos de Fe e Al (Novais e Smyth, 1999; Valladares et al., 2003; Novais et al, 2007), o que pode facilitar a distribuição do P em profundidade.

Ao final do terceiro ano de experimento (2017) e após a aplicação da terceira dose recomendada para as culturas em solo com nível médio de P, todas as fontes corrigiram o teor de  $P_{RTA}$  no solo acima do nível crítico (Figura 2), na camada 0-10 cm (Tabela 9). Dentre as fontes testadas podemos destacar a Mosaic quando a estratégia de adubação adotada foi a de Cultura e Yookarin e Bayóvar, quando de Sistema; as demais fontes não apresentaram diferença quanto a estratégia de adubação adotada. Já para a camada de 10-20 cm, a estratégia de adubação não influenciou o efeito das fontes aplicadas ao solo. Porém, ao analisarmos as médias do fator fontes, as fontes solúveis SFT e SFS apresentaram os maiores teores de P disponível em subsuperfície indicando que, nesse solo, a descida do P é favorecida com o uso de fosfatos solúveis de alta qualidade. O P de fontes solúveis ocupa rapidamente os sítios de adsorção, e com o tempo a capacidade de sorção do  $PO_4^-$  é reduzida, facilitando a distribuição do P em profundidade (Rodrigues et al. 2016). Os resultados corroboram com Franzini et al., (2009), Olibone e Rosolem, (2010) e Caires et al., (2017) que em estudos conduzidos em solo ácido de baixa fertilidade, demonstraram que a aplicação de fosfatos com diferentes solubilidades aumentou a disponibilidade de P do solo na camada 0-20 cm, com efeitos positivos para as culturas de inverno e verão.

Em solo corrigido (alto P) a dose de  $115 \text{ kg ha}^{-1}$  recomendada foi suficiente para manter a disponibilidade de P acima do nível crítico e não foram observadas diferenças entre as fontes e/ou estratégias de adubação empregadas (Tabela 10). Dessa forma, todas as fontes foram eficientes em manter os níveis de P na classe de disponibilidade alta, proporcionando altas produtividades (Tabela 7). A partir do solo corrigido, ou seja acima do nível crítico, fontes parcialmente solúveis como termofosfatos e fosfatos naturais podem ser utilizadas para manutenção da fertilidade do solo e a longo prazo, devido ao efeito residual, a eficiência dessas fontes pode ser ainda maior (Sousa et al., 2008; Franzini et al., 2009, Caires et al., 2017). Além disso, a partir da correção da deficiência de P o efeito da estratégia de adubação é menor dentro do manejo da adubação fosfatada, podendo o técnico adotar critérios econômicos para tomada de decisão. Muitos autores destacam que a disponibilidade de P e, conseqüentemente, a produtividade depende da interação de vários fatores como tipo de solo, forma de aplicação, do sistema de cultivo adotado e da fonte

utilizada (Rheinheimer & Anghinoni, 2003; Santos et al., 2008; Rodrigues et al., 2016). Dessa forma, a flexibilização do manejo da adubação em solo de fertilidade construída em SPD, pode representar um importante avanço em nível regional.

#### 4.3. Índice de eficiência agrônômica (IEA) e Retorno econômico líquido (REL)

Fontes solúveis proporcionaram altos IEA mesmo em solos deficientes em P, portanto, sendo viáveis para uso no manejo da adubação que visa a construção da fertilidade em solos da região. As fontes solúveis são fosfatos de alto valor agrônômico sendo utilizadas como referência em vários estudos de adubação (Faria e Guardieiro, 2011; Moreira et al. 2014; Silva et al. 2014; Santos, 2016; Barreto et al., 2018). A disponibilização imediata do P ao solo permite corrigir a deficiência e ao mesmo tempo fornece P as plantas, o que aumenta sua resposta produtiva, uma vez que, em cenário de deficiência as culturas são muito dependentes do P aplicado via fertilizante.

Fontes de alta solubilidade como o SFT e SFS são compostos, principalmente, de fosfato monocálcico, uma forma solúvel de P que prontamente se torna disponível para a absorção pela planta (Barreto et al., 2018), o que pode ter favorecido o maior aproveitamento do P de fertilizantes de alta solubilidade em condição de deficiência de P, quando aplicado antes de cada cultivo. Por outro lado, em ambiente com alta disponibilidade de P podem ser adotadas estratégias de adubação que exijam menores operações na lavoura, como a adubação de sistema, podendo em alguns casos melhorar a eficiência de alguns fertilizantes.

Já os fosfatos parcialmente solúveis como o Bayóvar podem ser uma alternativa às fontes solúveis em solos corrigidos, pois apresentaram IEA médios, semelhante aos fosfatos solúveis. Da mesma forma, em estudo conduzido por Barreto et al. (2018), o IEA do Bayóvar foi superior aos FN de Araxá e Patos de Minas e equivalentes ao SFT, o que comprova o alto valor do fosfato natural (FN) Bayóvar como fertilizante, justificando o desempenho apresentado nos três ensaios. Porém, Faria e Guardieiro (2011); Santos (2016) e Barreto et al. (2018) relataram que o Bayóvar foi uma fonte menos eficiente do

que fertilizantes solúveis de alta qualidade como o SFT, para culturas anuais; o que, de forma geral, também foi observado nesse estudo para solos com teor de P abaixo do NC.

No caso do termofosfato Yoorin a melhora no IEA em solos com teor alto de P, se deve a adubação de cultura, indicando que mesmo em cenário de alta disponibilidade o uso dessa fonte é limitado. Porém, vale ressaltar que o IEA utiliza uma relação entre o ganho de produtividade pela utilização de uma fonte padrão (SFT) e o ganho pelo uso da fonte testada (Yoorin). Como a diferença entre o controle e os tratamentos com adubação é pequena em solos com alto P, podemos identificar diferenças entre os IEA que não são observadas na produtividade, como observado nesse estudo (Tabela 6). Silva (2014) também não encontrou diferença entre o Yoorin e SFT na produtividade da soja, o que sugere que em algumas situações o Yoorin pode ser utilizado como fonte de P. Resultados semelhantes foram encontrados por Moreira et al. (2014), em que o termofosfato Yoorin apresentou eficiência agrônômica semelhante ao SFT quanto ao aumento da produtividade da soja em Latossolo no Cerrado. Dessa forma, o Yoorin pode ser uma fonte alternativa, em solo de fertilidade construída, principalmente em sistemas de rotação com soja.

Em solo com teor de P alto, todas as fontes proporcionaram a mesma eficiência agrônômica (IEA) e atuaram também de forma similar em manter os teores de P no solo (Tabela 9). Neste sentido, um aspecto relevante é a avaliação do retorno econômico líquido (REL) advindo do uso das diferentes fontes de P, o qual além da resposta em produtividade das culturas, leva em consideração o custo (valor de mercado) das fontes.

Além de corrigir a deficiência de P do solo com baixo P, devido a seu menor custo, as fontes solúveis proporcionam os maiores retornos econômicos da adubação fosfatada. Os maiores REL foram observados para a cultura da soja, em solos com teor inicial baixo de P quando do uso de fontes solúveis.

O REL da adubação fosfatada nos cereais de inverno, apesar de ser menor que o da soja, também foi maior em solo com baixo P e também se deram pelo uso de fontes solúveis, porém variou em função da estratégia de adubação. Para todas as fontes solúveis os REL foram superiores para os cereais de inverno, quando a adubação de sistema foi adotada, mas sem que a aplicação do fertilizante integralmente no inverno tenha determinado prejuízo em termos

de REL na cultura da soja. O mesmo foi observado para os solos com P médio e alto (Figuras 3b e 3c), em que, apesar do menor lucro, o REL dos fertilizantes SFT, SFS e Mosaic são maiores nos cereais de inverno quando da adubação de sistemas, em solos com médio e alto P. Os resultados demonstram a importância da adubação de sistemas em solos com fertilidade construída em SPD, principalmente pelo ganho prático e econômico que ela pode representar (Altmann, 2012, Caires et al., 2017). Dessa forma, durante a correção da disponibilidade de P os fosfatos solúveis aumentaram a produtividade, corrigiram a deficiência de P, e apresentaram os maiores IEA e REL.

De modo geral o alto custo dos fosfatos parcialmente solúveis (Yoorin e Bayóvar) comprometem o seu uso, independente da condição de disponibilidade de P do solo (abaixo ou acima do NC), sendo preteridos em relação as fontes solúveis SFT e SFS, principalmente em solos com teor de P abaixo do NC, quando altas doses de fertilizantes são exigidas. Portanto, em solos com teor de P acima do NC, os fosfatos solúveis SFT e SFS se destacam em função do menor custo em relação as demais fontes de P. E nos solos com teor de P abaixo do NC isto também ocorre devido ao maior impacto positivo destas fontes (maior eficiência agronômica) na produtividade das culturas.

O REL foi inversamente proporcional ao nível de P inicial do solo, mesmo com a necessidade de altas doses de  $P_2O_5$  em solo com baixo P. Porém, com o aumento do nível de P no solo o REL da soja diminui e proporcionalmente aumenta-se o REL dos cereais de inverno, principalmente quando a estratégia de adubação de sistema é utilizada (Figura 3b e 3c). Em solo com alto P, os únicos tratamentos em que o REL foi positivo para as duas safras (inverno e verão), foram os com SFT e SFS associado a adubação de sistema. Dessa forma, a partir da construção da fertilidade em SPD, os benefícios ao sistema solo-planta de sistemas conservacionistas associados a adubação de sistema podem ser traduzidos em retorno econômico aos produtores da região.

Contudo, é importante destacar que apesar do baixo retorno econômico da adubação fosfatada em solos com teor de P alto, a adubação deve ser realizada visando manter o teor no solo.

#### 4.4. Estimativa do teor crítico de P disponível no solo para cultura da soja

A baixa mobilidade e redistribuição em profundidade do P proporciona NC bem superiores quando apenas a camada superficial é considerada (Vieira et al., 2014). Dessa forma, o NC de  $P_{RTA}$  (0-20 cm) determinado nesse estudo ( $30 \text{ mg dm}^{-3}$ ) foi inferior ao de  $45 \text{ mg dm}^{-3}$  estimado previamente para solos da região (Fontoura, SMV, dados não publicados). Entretanto, quando se considera que o NC de P (Mehlich 1) para soja e milho ( $6,2 \text{ mg dm}^{-3}$ ) é aproximadamente 25% inferior do que para cereais de inverno ( $8,2 \text{ mg dm}^{-3}$ ) (Vieira et al. 2014) e, considerando que no presente estudo o NC de  $P_{RTA}$  foi determinado apenas para a cultura da soja, pode-se concluir que o NC de  $P_{RTA}$  de  $45 \text{ mg dm}^{-3}$  é bastante confiável e válido para as principais culturas de inverno e de verão do sistema de produção regional.

A determinação de NC específicos para o SPD, com diferentes extratores de P, é fundamental para o avanço do manejo da adubação, principalmente em sistemas de produção que utilizam fosfatos naturais. Dessa forma, técnicos e produtores da região terão maior flexibilidade no manejo da adubação em sistema plantio direto consolidado, podendo utilizar os NC estimados por Vieira et al. (2014) para o extrator Mehlich 1 e os determinados nesse estudo quando o P disponível for determinado por RTA.

### 5. Conclusões

Quando o teor de P no solo está abaixo do nível crítico (teores de P baixo e médio), as culturas são dependentes do P fornecido via adubação e, portanto, devem ser utilizadas fontes solúveis de P aplicadas na semeadura de cada cultivo (estratégia de adubação de cultura).

Quando o teor de P disponível no solo está acima do nível crítico, a adubação de sistema, na qual o fertilizante da cultura de verão é aplicado antecipadamente na semeadura da cultura de inverno, proporciona rendimento de grãos da soja semelhante a adubação em cada cultivo. Nesta condição de solo corrigido a adubação de manutenção visa repor a exportação de P pela



colheita de grãos e qualquer das fontes de P testadas podem ser utilizadas sem restringir o rendimento de grãos.

A correção dos teores de P no solo se deu após três anos, porém, ocorreu principalmente na camada superficial (0-10 cm). Apenas no solo com P alto, a correção ocorreu parcialmente também na camada de 10-20 cm.

Quanto menor o teor de P no solo, maior o retorno econômico líquido (REL) decorrente da aplicação dos fertilizantes fosfatados, sendo os maiores retornos econômicos observados na cultura da soja. Por sua vez, para solos com teor de P médio e alto, o maior retorno econômico líquido ocorre nas culturas de inverno, principalmente quando é adotada a adubação de sistema.

O nível crítico de  $P_{RTA}$  de  $30 \text{ mg dm}^{-3}$  para a camada de 0-20 cm obtido para a cultura da soja no presente estudo ratifica o valor de  $45 \text{ mg dm}^{-3}$  obtido previamente e válido para cereais de inverno e soja e milho, pois conforme este estudo prévio o NC para cereais de inverno é em torno de 25% maior do que para soja e milho.

## **CAPÍTULO IV - Abastecimento de formas de fósforo em Latossolos subtropicais em plantio direto quando da correção com fosfatos de diferente solubilidade**

### **Resumo**

Durante a correção da disponibilidade a maior parte do P adicionado não é aproveitado pelas culturas, permanecendo no solo. O presente estudo objetivou avaliar como se dá o abastecimento de formas disponíveis e não disponíveis de P em Latossolos em plantio direto quando da correção com fosfatos solúveis e parcialmente solúveis. Em experimentos conduzidos em solos deficientes em P (baixa e média disponibilidade) foram avaliados cinco fosfatos [três solúveis (SFT, SFS e Yookarin) e dois parcialmente solúveis (Yoorin e Bayóvar), em duas estratégias de adubação (adubação de cultura e de sistema), mais um tratamento controle. Doses anuais de 350 e 190 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> foram aplicadas nos solos com baixo e médio P, respectivamente. Ao final do 3<sup>o</sup> ano, o solo foi amostrado (0-10 cm) e submetido ao fracionamento químico sequencial de P proposto por Hedley et al., (1982). Os fosfatos solúveis abastecem e mantêm frações inorgânicas lábeis e de labilidade moderada (P<sub>RTA</sub> e P<sub>ibic</sub>, P<sub>iNaOH0.1</sub>) e frações orgânicas de labilidade moderada (P<sub>ONaOH0.1</sub>), cuja eficiência é maior quando aplicados a cada cultivo. Por sua vez, os fosfatos parcialmente solúveis corrigiram a deficiência de P mas foram pouco influenciados pela estratégia de adubação. O fosfato natural (Bayóvar) aumentou principalmente as frações inorgânicas P<sub>HCl</sub>, indicando que o P disponível em cada solo é abastecido de forma diferente por cada fonte. No processo de correção do P de solos deficientes em P, as frações orgânicas de moderada labilidade receberam a maior parte do P adicionado, enquanto que as frações inorgânicas foram as mais intensamente abastecidas e isso é relacionado ao compartimento de P orgânico muito mais representativo do que o inorgânico nos Latossolos subtropicais.

**Palavras chave:** Fosfato natural, adubação de sistema, labilidade do fósforo.

## 1. Introdução

Os Latossolos são solos representativos de áreas agrícolas no Brasil e na região Centro-Sul do Paraná. Devido à grande capacidade de adsorção de fosfatos, nesses solos são necessárias altas doses de fertilizantes para corrigir os teores de P e obter altas produtividades (Fontoura et al., 2015). Estudos recentes estimam a necessidade de doses superiores a  $1 \text{ Mg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  para corrigir a deficiência de P em solos da região (Vieira et al., 2015; Fontoura et al., 2015). Dessa forma, é preciso compreender como ocorre a distribuição e acúmulo no solo do P adicionado via fertilizante em condição de deficiência do nutriente, uma vez que, para corrigir a disponibilidade é necessário alto investimento em insumos, e o retorno econômico está condicionado à eficiência do manejo da adubação.

A eficiência da adubação fosfatada pode ser influenciada por diferentes fatores, dentre os quais pode-se destacar a fonte utilizada e a estratégia da adubação adotada. Além disso, devido à alta complexidade de distribuição e reatividade do P no solo, sistemas de manejo conservacionistas como o sistema plantio direto (SPD), que é predominante na região, podem alterar a distribuição e o abastecimento das formas orgânicas e inorgânicas de P a partir da adubação. O aporte contínuo de resíduos promove aumento da matéria orgânica do solo (MOS) e, conseqüentemente, do fósforo orgânico (Po). O não revolvimento do solo restringe o contato do fertilizante ao solo da linha de adubação/semeadura, o que contribui para a saturação dos sítios de adsorção de P, aumentando a sua disponibilidade próximo as raízes das plantas. Além disso, em SPD a maior concentração de ácidos orgânicos pode contribuir para o aumento de formas lábeis de P, pois esses ácidos competem com o fosfato pelos sítios de adsorção, diminuindo a quimiosorção e aumentando a disponibilidade de P (Rheinheimer e Anghinoni, 2001; Rheinheimer et al., 2008; Fink et al., 2016).

Além do sistema de manejo, o uso de fontes de P com diferente solubilidade pode influenciar o modo como o solo imobiliza e disponibiliza o P oriundo do fertilizante. De modo geral, em solos tropicais/subtropicais, a maioria do P aplicado é predominantemente adsorvido aos óxidos de Fe e Al com alto grau de energia, determinando uma baixa eficiência do P aplicado (Pearse et al., 2007; Rodrigues et al., 2016). Fosfatos solúveis disponibilizam rapidamente P na

solução e, como consequência, a longo prazo, uma proporção maior do P é convertido a frações não disponíveis em relação ao uso de fosfatos parcialmente solúveis como os fosfatos naturais (Soltangheisi et al., 2018). Por sua vez, a liberação imediata de P pode corrigir e manter o P lábil de forma rápida e eficiente, uma vez que os sítios de adsorção são ocupados num menor tempo em relação aos fosfatos naturais (FN), diminuindo o efeito da quimiosorção de P, o que pode aumentar a disponibilidade (Soltangheisi et al., 2018), mas não necessariamente representa um melhor aproveitamento do P aplicado por fontes solúveis.

Dentre as estratégias de adubação destaca-se a adubação da cultura, a qual é mais amplamente utilizada e disponibilizar P para a cultura em desenvolvimento visando a máxima rentabilidade e eficiência do nutriente aplicado (Leikam et al., 2003; Mallarino, 2009). Mais recentemente, tem crescido o interesse pela adubação de sistema, principalmente em solos em SPD com solo corrigido e são adotadas práticas como rotação de culturas, que intensificam a ciclagem dos nutrientes no sistema solo-planta. Nessa situação, a atividade biológica também é alta, com balanço positivo de carbono, e condições estruturais e funcionais do solo adequadas ao suprimento de nutrientes às culturas (Fontoura et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016). Na adubação de sistema com P preconiza-se um suprimento contínuo do nutriente em sincronia com o desenvolvimento das culturas, sendo a adubação feita na cultura de maior exigência, geralmente os cereais de inverno na região Centro-Sul do Paraná. Esta estratégia também contribui para a maior distribuição do fertilizante aplicado considerando o menor espaçamento das entrelinhas no inverno (Altmann, 2012; Fontoura et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016).

Os diferentes fosfatos (solúveis ou parcialmente solúveis) atuam de maneira particular no solo para disponibilizar P, e a estratégia de manejo da adubação (cultura e sistema) pode potencializar o efeito da adubação dependendo do nível de P no solo. Porém, a distribuição no P no solo é complexa e sua disponibilidade é dependente da interação de diferentes frações de P, que podem agir como fonte ou dreno de P (Soltangheisi et al., 2018; Tiecher et al., 2018). Dessa forma, o estudo das diferentes frações químicas de P proposta por Hedley et al. (1982) pode auxiliar no entendimento das causas da maior ou menor eficiência dos tipos de fosfatos utilizados na adubação visando o

suprimento de P à cultura e a correção do solo. O fracionamento de P determina frações de P associadas a componentes orgânicos e minerais do solo com diferentes graus de energia. O estudo dessas frações pode indicar como o solo disponibiliza P às plantas, pois a fração disponível estimada nas análises de rotina é resultado da interação entre as diferentes frações químicas de P no solo (Tiecher et al., 2018).

De modo geral, a adubação fosfatada promove acúmulo de P no solo em frações inorgânicas (Pi) de moderada labilidade (Rheinheimer, 2000; Gatiboni, 2003; Gatiboni et al., 2013; Soltangheisi et al., 2018). No entanto, pouco se sabe sobre como fosfatos de diferente solubilidade modificam as frações inorgânicas e orgânicas de P durante o processo de correção da disponibilidade de P, sob diferentes estratégias da adubação em SPD. A nossa hipótese inicial foi que em solos deficientes em P o abastecimento das frações de P é diferente para cada fonte e pode ser influenciado pela estratégia de adubação, o que irá influenciar no modo como o solo disponibiliza P as plantas.

Nesse sentido, os objetivos deste estudo foram avaliar como diferentes fontes de P e estratégias de adubação atuam no abastecimento de frações inorgânicas e orgânicas de P e disponibilizam P as plantas em Latossolos subtropicais deficientes em P manejados em SPD.

## **2. Material e métodos**

### **2.1. Descrição do local de estudo e delineamento experimental**

O estudo foi desenvolvido em dois experimentos instalados em Latossolo Bruno alumínico (Embrapa, 2016) com teores de P médio (município de Candói) e baixo (município de Campina do Simão), na região centro-Sul do Paraná. A caracterização do solo das áreas experimentais consta na Tabela 11.

Os tratamentos consistiram da aplicação de cinco fontes de P e de duas estratégias de adubação (cultura e sistema), os quais seguiram um delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial com tratamento adicional (5x2+1), e três repetições. As doses de P aplicadas foram 190 e 350 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nos solos com teores de P médio e baixo, respectivamente, as quais foram aplicadas na linha de semeadura. Três fontes solúveis de P (Superfosfato triplo - SFT,

Superfosfato simples – SFS, Yookarin) e duas fontes de solubilidade moderada (Yoorin e Fosfato natural Bayóvar) foram avaliadas, cujas quantidades de fertilizante aplicadas nos solos com P baixo e médio constam na Tabela 12.

**Tabela 11. Caracterização química inicial dos Latossolos Bruno aluminico (camada 0-10 cm) com teor inicial de P médio e baixo.**

Disponibilidade	Argila	COT	pH	P*	K	Al	Ca	Mg	T	V	m
	-----g kg <sup>-1</sup> -----			mg dm <sup>-3</sup>		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				----%---	
Médio	500	29	5,4	7,4	0,3	0,1	7,0	4,7	19	82	1
Baixo	600	30	5,4	3,3	0,2	0,1	4,3	4,0	15	48	4

\* Mehlich-1. COT (Carbono Orgânico Total); T (Capacidade de troca de cátions - CTC a pH 7.0); V (Saturação por bases); m (Saturação por Al).

**Tabela 12. Caracterização das fontes e doses utilizadas nos solos com teor inicial de P médio e baixo.**

Fonte	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		Dose	
	Total	Solúvel*	kg ha <sup>-1</sup> ano de fertilizante	
			Médio P	Baixo P
Sem P	-	-	-	-
<b>Fertilizantes solúveis</b>				
SFT	46	45	422	778
SFS	21	19	1000	1842
Yookarin	36	27	704	1296
<b>Fertilizantes parcialmente solúveis</b>				
Yoorin	17	16	1188	2188
Bayóvar	29	14	1357	2500

\*Citrato neutro de amônio + água.

Na estratégia de adubação por cultura, a dose anual de P foi fracionada com aplicação de 50% na cultura de inverno e 50% na cultura de verão. Na estratégia de adubação de sistema, a dose anual foi aplicada exclusivamente na semeadura da cultura de inverno. A adubação foi realizada por três anos consecutivos até o momento da coleta das amostras de solo.

## 2.2. Amostragem do solo e fracionamento químico sequencial de P

Ao final do 3º ano de condução dos experimentos amostras de solo foram coletadas em triplicata na camada de 0-10 cm de profundidade. Posteriormente foram secas em estufa a 50°C, moídas, peneiradas a 2 mm e armazenadas.

As formas de P do solo foram determinadas conforme metodologia descrita por Hedley et al. (1982), com modificações descritas em Rheinheimer (2000). As formas de P foram sequencialmente extraídas pelos seguintes extratores: resina de troca aniônica (RTA) (2,5 cm<sup>2</sup>) (placas AR 103 QDP 434) (Pi); NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> à pH 8,5 (Pi e Po); NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (Pi e Po); HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> (Pi); NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> (Pi e Po). Todos os extratores permaneceram em contato com a amostra durante 16 horas em agitador tipo 'sem fim' (33 rpm), com posterior centrifugação a 3500 rpm por 15 minutos. Nos extratos alcalinos de NaHCO<sub>3</sub> e NaOH, o P total do extrato foi estimado por digestão com persulfato de amônio e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> em autoclave a 121°C (USEPA, 1971), e posterior determinação do P conforme metodologia de Murphy e Riley (1962). O fósforo inorgânico (Pi) desses extratos foi determinado pelo método de Dick e Tabatabai (1977). O fósforo orgânico (Po) foi obtido pela diferença entre P total e o Pi dos extratos alcalinos. O P residual e total foi determinado por digestão com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> na presença de MgCl<sub>2</sub> saturado (Olsen e Sommers, 1982). A estimativa do Po total extraível foi feita pela soma das frações orgânicas (P<sub>Obic</sub>, P<sub>ONaOH0.1</sub> e P<sub>ONaOH0.5</sub>) e o Pi total extraível pela soma das frações inorgânicas (P<sub>RTA</sub>, P<sub>ibic</sub>, P<sub>INaOH0.1</sub>, P<sub>IHCl</sub> e P<sub>INaOH0.5</sub>). O P extraído pela resina de troca de ânions (P<sub>RTA</sub>) e NaHCO<sub>3</sub> (P<sub>ibic</sub> e P<sub>obic</sub>) foi considerado lábil (PL) e o extraído por NaOH (P<sub>INaOH0.1</sub>, P<sub>INaOH0.5</sub>, P<sub>ONaOH0.1</sub> e P<sub>ONaOH0.5</sub>) e HCl (P<sub>IHCl</sub>) moderadamente lábil (PML). O P residual foi considerado não-lábil.

## 2.3. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância ao nível de 5% e, quando significativo, a diferença entre médias de tratamentos foi avaliada pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância. O esquema fatorial duplo com tratamento adicional é representado por: A x B + 1, em que A representa o primeiro fator com i níveis (i= 1, 2, 3...a) e B representa o segundo fator com j

níveis ( $j=1, 2, 3\dots b$ ) com adição do tratamento adicional. Para os resultados de labilidade, os tratamentos foram comparados com o controle pelo teste de Dunnett ao nível de 5% de significância. Para análise de todos os tratamentos em conjunto foi utilizada uma análise de componentes principais (ACP) e posterior análise de agrupamentos por soma de quadrados (Ward), utilizando o programa MULTIV 3.5b.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Fontes de P

Em solo com teor inicial baixo de P os fosfatos solúveis SFT e Yookarin aumentaram as frações inorgânicas ( $P_{RTA}$  e  $P_{bic}$ ) e orgânicas de P no solo ( $P_{NaOH0.1}$ ), enquanto o SFS teve efeito apenas nas frações inorgânicas (Figura 5a e 5b). Já, em solo com nível médio de P o Yookarin proporcionou o maior aumento médio sobre as frações inorgânicas mais lábeis de P ( $P_{RTA}$  e  $P_{bic}$ ), em relação aos demais fosfatos (Figura 6a). As maiores modificações foram observadas com o uso de fontes solúveis, em ambos os solos, indicando que a rápida liberação do P no solo amplia a capacidade de suprimento de P do solo às culturas (Figuras 5b e 5b).

A rápida liberação do nutriente mostrou-se uma vantagem em relação aos fertilizantes parcialmente solúveis, o que pode explicar os resultados de produtividade das culturas (Estudo 1). Além disso, não foi observado efeito sobre a fração inorgânica de baixa labilidade ( $P_{NaOH0.5}$ ) quando do uso de fontes solúveis em ambos os solos, indicando que o P liberado pelos fertilizantes solúveis permaneceu em formas mais disponíveis, sendo disponibilizado às plantas num prazo mais curto do que as fontes de solubilidade moderada (Pearse et al., 2007; Rodrigues et al., 2016; Soltangheisi et al., 2018).

A rápida liberação de P das fontes de maior solubilidade (SFT e SFS) teve pouca influência no acúmulo de Po em frações mais estáveis no solo como o  $P_{NaOH0.5}$ . Todavia, os resultados indicam que o P adicionado foi absorvido pelas culturas e está ciclando no solo, possivelmente em frações orgânicas e inorgânicas menos estáveis ( $P_{NaOH0.1}$ ), que pode vir a ser disponibilizado num curto prazo para o sistema, uma vez que, parte do Po proveniente da

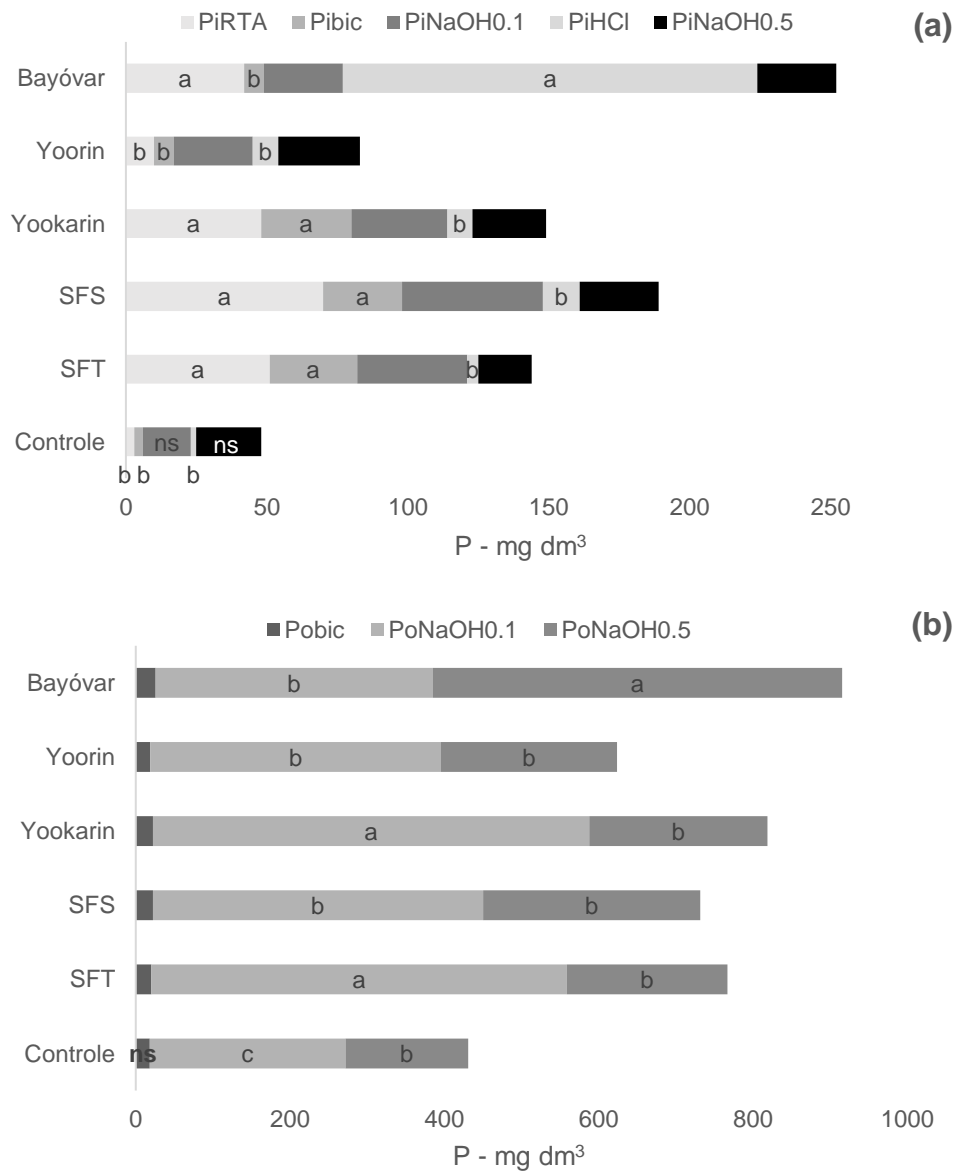


decomposição dos resíduos das cultura é convertido em formas lábeis e parte é imobilizado (Conte et al., 2003; Rheinheimer et al., 2008; Gatiboni et al., 2013).

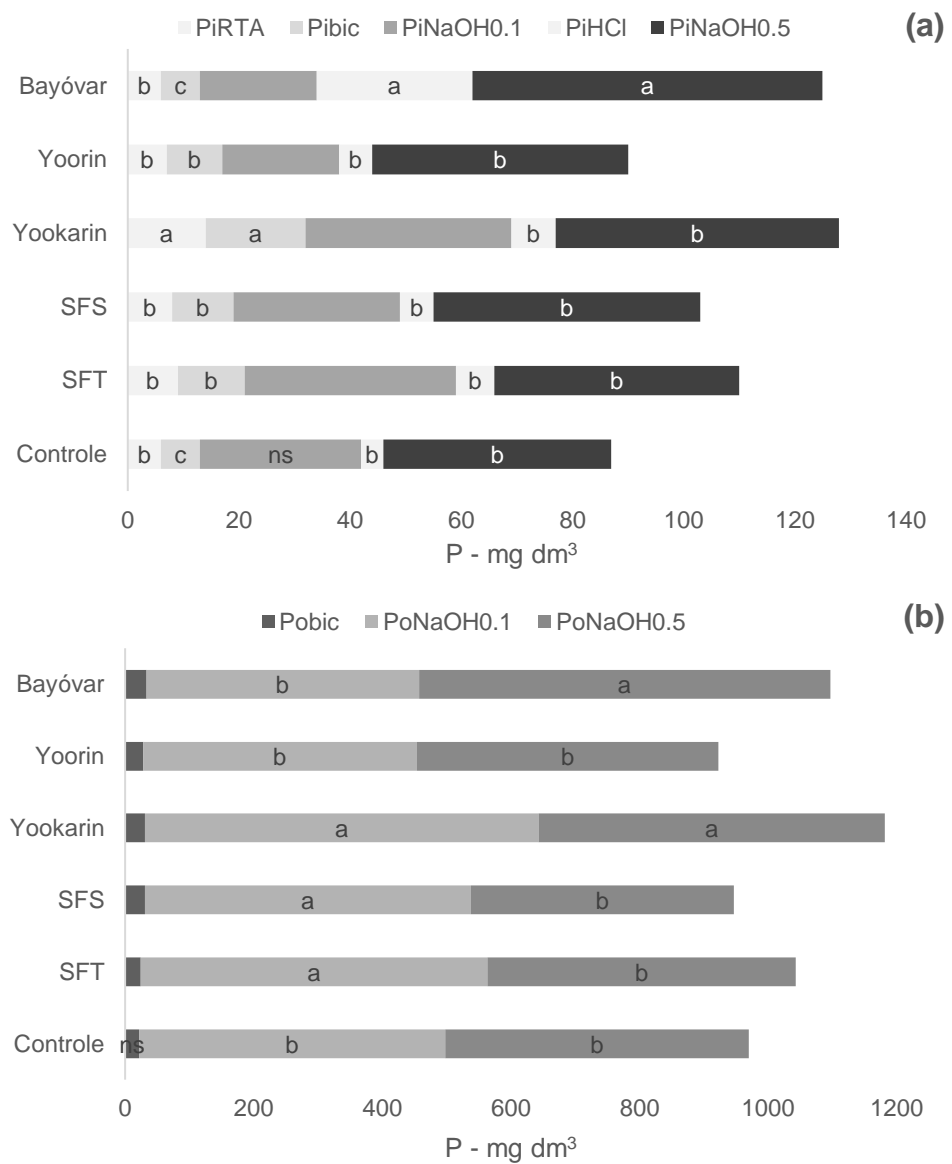
O uso de fontes parcialmente solúveis (Yoorin e Bayóvar) foi menos eficiente no abastecimento de P em frações inorgânicas lábeis de P nos solos (Figura 5a e 6a). Como esperado, em ambos os solos, o principal efeito do uso do Bayóvar foi o aumento da fração  $P_{iHCl}$ , uma vez que, essa fração está relacionada aos fosfatos de Ca, principal componente dos fosfatos naturais (Gatiboni et al., 2013). Porém, pode-se destacar que em solo com teor inicial baixo de P, o teor de  $P_{RTA}$  com aplicação de Bayóvar foi similar ao solo em que foi realizada a aplicação das fontes solúveis e maior que o tratamento controle, indicando que o Bayóvar pode ser uma alternativa a alguns fertilizantes solúveis para abastecer formas disponíveis e, portanto, corrigir a disponibilidade de P em Latossolos em SPD. Resultados semelhantes foram relatados por Barreto et al. (2018) e confirmados pelos dados de produtividade e eficiência agrônômica no Estudo I.

A análise indica que o uso do Bayóvar aumentou as frações orgânicas de baixa labilidade de P ( $P_{NaOH0.5}$ ) nos dois solos avaliados (Figura 5b e 6b). Dessa forma, a liberação gradual do P aplicado mesmo em situação de deficiência, não está comprometendo o aproveitamento do P pelas culturas e proporcionalmente mais P pode estar sendo acumulado em frações orgânicas quando do uso de Bayóvar. Porém, vale ressaltar que devido ao curto período de instalação do experimento (três anos) não é coerente afirmar que o P tenha atingido alto grau de estabilidade no solo como a fração  $P_{NaOH0.5}$ , que está associada ao P protegido físico-quimicamente no interior dos microagregados (Hedley et al., 1982; Condon et al., 1985; Linnquist et al., 1997). O mais provável é que o P orgânico esteja sendo superestimado pelo método de análise de Hedley et al. (1982), como relatado por Tiecher et al. (2021), em que os autores destacaram que o P orgânico foi superestimado em cerca de 10 vezes pelo método de Hedley et al. (1982) em relação ao P<sub>o</sub> determinado pelo método  $^{31}P$ -RMN. Isso ocorre por que o P<sub>o</sub> é medido indiretamente por diferença entre o P total e o P inorgânico extraído com reagentes alcalinos ( $NaHCO_3$  e  $NaOH$  0.1 e 0.5 mol L<sup>-1</sup>). A determinação do P inorgânico é indicada pelo P reagente como o molibdato. No entanto, existem vários compostos P inorgânicos nesses extratos

que pode não reagir com molibdato, como pirofosfato, que podem ser contabilizados como "P orgânico" (Turner et al., 2005).



**Figura 5.** Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível baixo de P (Campina do Simão – PR) sob aplicação de diferentes fontes de P. [Barras seguidas de mesma letra dentro de cada fração, as médias não diferem entre si (Scott-Knott  $p < 0,05$ )].

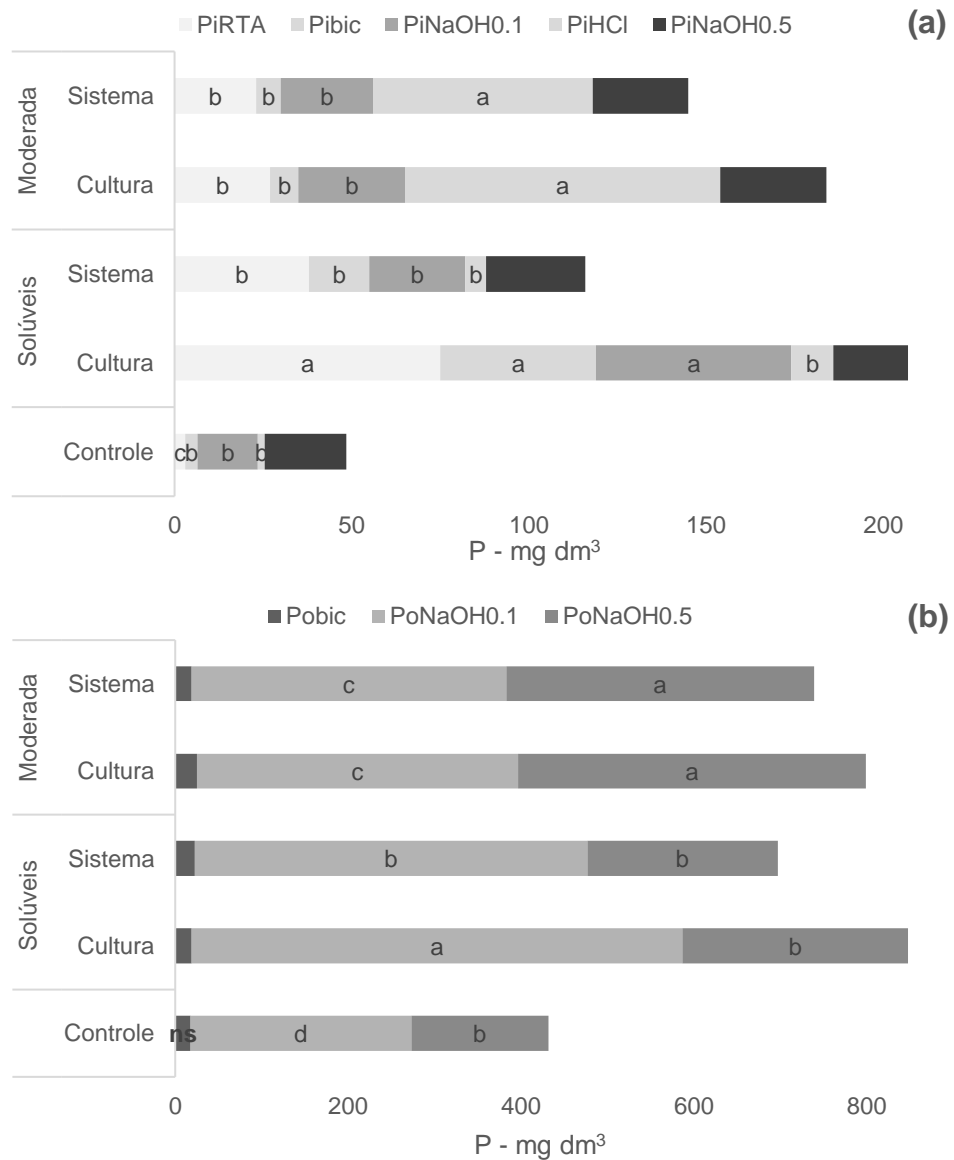


**Figura 6.** Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível médio de P (Candói – PR) sob aplicação de diferentes fontes de P. [Barras seguidas de mesma letra dentro de cada fração, as médias não diferem entre si (Scott-Knott  $p < 0,05$ )].

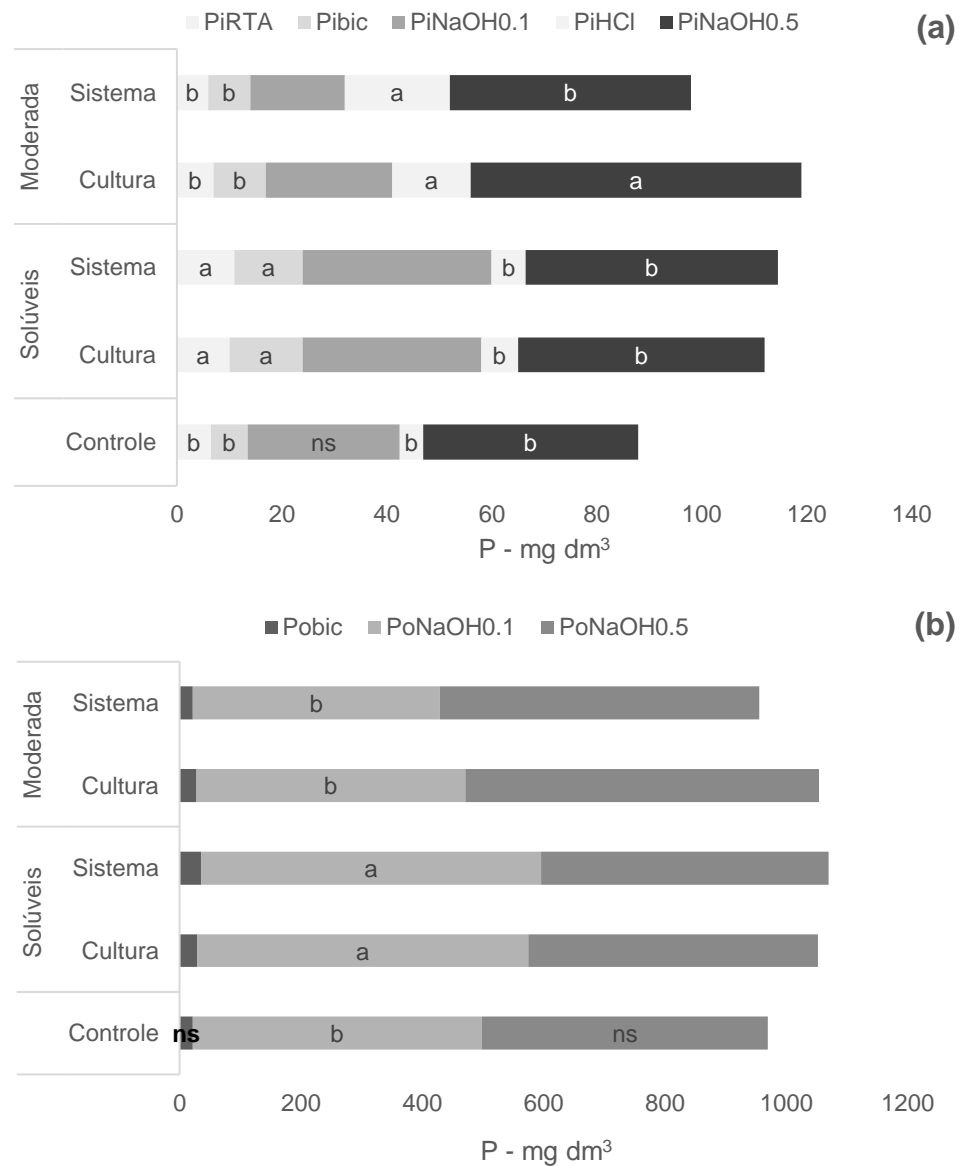
### 3.2. Estratégia de adubação

A estratégia de adubação de cultura aumentou o efeito das fontes solúveis sobre as frações de P em solo com teor inicial baixo de P (Figura 7). Fontes solúveis aplicadas a cada cultivo (adubação de cultura) apresentaram maiores teores de P no solo para as frações  $P_{iRTA}$ ,  $P_{i bic}$  e  $P_{O NaOH 0.1}$  em solo com baixo P e, portanto, correção da disponibilidade de P maior. Possivelmente, devido à rápida liberação de P dessas fontes diminuir o tempo de contato entre o fertilizante e o solo pode significar um maior aproveitamento do P aplicado, mesmo de fontes de alto valor agrônômico como os fosfatos solúveis. Dessa forma, em solos deficientes em P, quando do uso de fontes solúveis, espera-se um maior efeito corretivo com a adubação de cultura e maior retorno econômico (Leikam et al., 2003; Mallarino, 2009), o que foi observado no estudo I.

Por outro lado, em solo com teor inicial médio, não houve diferença entre as estratégias de adubação com o uso de fontes solúveis e de moderada solubilidade para todas as frações de  $P_i$  e  $P_o$  disponíveis (Figura 8). Dessa forma, o efeito da estratégia de adubação é menor em solos cujo teor de P está próximo ao nível crítico, possibilitando uma única aplicação anual de fertilizante, sem prejuízo à correção da disponibilidade. Cabe ressaltar que apesar do solo apresentar teor de P abaixo do nível crítico, o sistema de manejo adotado com SPD e rotação de culturas com culturas comerciais ou plantas de cobertura no inverno e soja no verão contribuem para esse comportamento favorável da adubação de sistema uma vez que nesse cenário espera-se uma melhor sincronia entre a disponibilidade e a demanda de nutrientes pelas culturas, decorrente da intensa e gradual ciclagem de nutrientes (Altmann, 2012; Fontoura et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016).



**Figura 7.** Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível baixo de P (Campina do Simão – PR) sob aplicação de fontes de P solúveis e de moderada solubilidade em duas estratégias de adubação. [Barras seguidas de mesma letra dentro de cada fração, as médias não diferem entre si (Scott-Knott  $p < 0,05$ )].



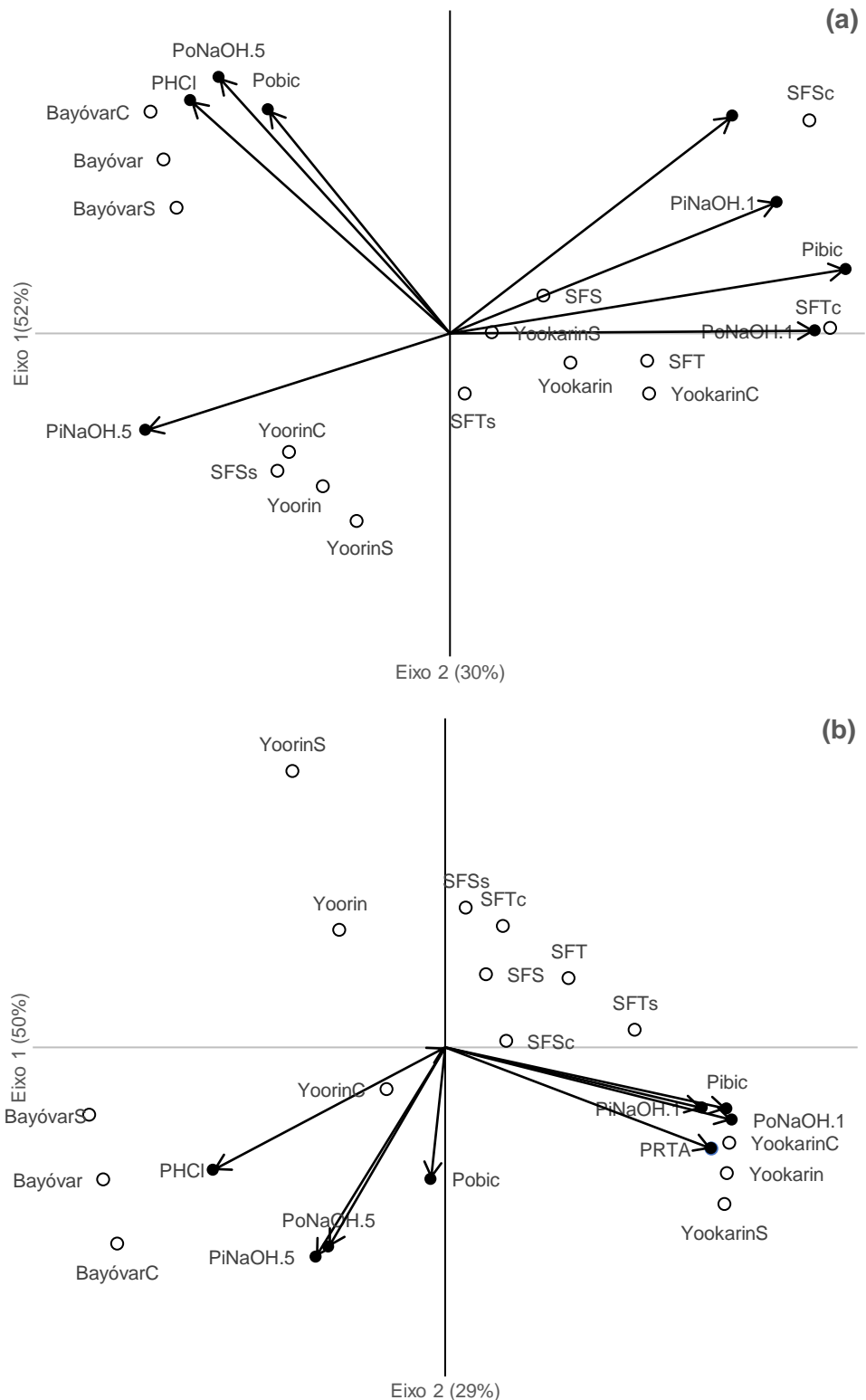
**Figura 8.** Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível médio de P (Candói – PR) sob aplicação de fontes de P solúveis e de moderada solubilidade em duas estratégias de adubação. [Barras seguidas de mesma letra dentro de cada fração, as médias não diferem entre si (Scott-Knott  $p < 0,05$ )].

Por sua vez, o efeito sobre frações disponíveis de P resultante da aplicação de fontes de moderada solubilidade não foi influenciado pela estratégia de adubação (Figura 7 e 8). Dessa forma, apesar do menor efeito corretivo em relação às fontes solúveis, fontes de moderada solubilidade foram pouco influenciadas pela estratégia de adubação, o que pode facilitar o manejo de adubação fosfatada, quando utilizadas na ausência de fontes solúveis, uma vez que apresentam menor eficiência agrônômica (Estudo I).

A análise de componentes principais (ACP) explicou 82% e 79% da variação de todas as frações de P avaliadas, em todos os tratamentos, em solos com teor inicial baixo e médio de P, respectivamente (Figura 9). A maior explicação se deu ao longo do eixo 1 para ambos os solos, com 52% em solo com baixo P (Figura 9a) e 50% em solo com médio P (Figura 9b). Em solo com teor inicial baixo de P a análise de agrupamentos identificou cinco grupos distintos para os tratamentos (Tabela 13) e em solos com médio P quatro grupos foram identificados (Tabela 4).

Os tratamentos com Bayóvar apresentaram alta correlação entre si, estando dentro do mesmo grupo em ambos os níveis iniciais de P no solo, indicando que independente da estratégia de adubação o efeito dessa fonte sobre as frações de P no solo foi similar (Tabela 13 e 14). Além disso, como observado no item 7.3.1. o uso do Bayóvar está associado ao aumento das frações  $P_{HCl}$  e  $P_{NaOH0.5}$ , porém essa relação é maior em solo com baixo P, em que os tratamentos com Bayóvar estão correlacionados às frações  $P_{Obic}$ ,  $P_{HCl}$  e  $P_{NaOH0.5}$  (Figura 9a).

Em solo com baixo P a ACP indicou que o efeito da aplicação de fontes solúveis, é diferente em cada estratégia de adubação (Figura 9a). Para o SFT e SFS a análise de agrupamentos identificou diferentes grupos quando a estratégia de adubação (sistema ou cultura) é modificada, indicando que em solo com teor inicial baixo de P a estratégia de adubação modifica o aproveitamento do P aplicado por fontes solúveis (Tabela 12).



**Figura 9.** Análise de componentes principais (PCA) de frações de fósforo inorgânico e orgânico na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível baixo (a) e médio (b) de P sob aplicação de fontes de P solúveis e de moderada solubilidade em duas estratégias de adubação. [SFTc (SFT cultura); SFTs (SFT sistema); SFSc (SFS cultura); SFSs (SFS sistema) YookarinC (Yookarin cultura); YookarinS (Yookarin sistema); YoorinC (Yoorin cultura); YoorinS (Yoorin sistema); BayóvarC (Bayóvar cultura); BayóvarS (Bayóvar sistema)].



**Tabela 13. Análise de agrupamento hierárquico (Ward) dos tratamentos em Latossolo bruno com teor inicial baixo de P. (Cinco grupos nítidos)**

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
SFT	Yoorin	Bayóvar	SFTs	SFTc
SFS	SFSs	BayóvarS	YookarinS	SFSs
Yookarin	YoorinS	BayóvarC		
YookarinC	YoorinC			

**Tabela 14. Análise de agrupamento hierárquico (Ward) dos tratamentos em Latossolo bruno com teor inicial médio de P. (Quatro grupos nítidos)**

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
SFT	Yookarin	Yoorin	Bayóvar
SFTs	YookarinS	YoorinS	BayóvarS
SFTc	YookarinC		BayóvarC
SFS			
SFSs			
SFSs			
YoorinC			

Aplicar SFT e SFS em cada cultivo (SFT<sub>c</sub> e SFS<sub>c</sub>) apresenta alta correlação com as frações mais disponíveis de P no solo (P<sub>RTA</sub>, P<sub>i bic</sub>, P<sub>i NaOH0.1</sub> e P<sub>o NaOH0.1</sub>), comprovando ser a estratégia adequada em situação de solos pobres em P (Figura 9a). Por outro lado, com uma única aplicação anual do SFS<sub>s</sub> (adubação de sistema) a relação é inversa às frações disponíveis. Dessa forma, adubação de cultura deve ser utilizada durante a correção da disponibilidade de P em solo com baixo P.

Em solo com teor inicial médio de P (Figura 9b), a análise de agrupamentos não identificou diferenças entre os tratamentos com fontes solúveis em ambas estratégias de adubação. Todos os tratamentos com SFT e SFS não diferiram, formando um único grupo e o mesmo foi observado para o Yookarin. Dessa forma, a estratégia de adubação apresentou pouco efeito sobre os fosfatos em solo com teor de P próximo ao nível crítico, confirmando que a partir da correção ambas estratégias de adubação podem ser adotadas (Altmann, 2012; Fontoura et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016). Porém, dentre as fontes solúveis, os tratamentos com Yookarin apresentaram maior correlação com as frações mais disponíveis de P (P<sub>RTA</sub>, P<sub>i NaOH0.1</sub> e P<sub>i bic</sub>), indicando ser preferível às demais fontes solúveis em solo com médio P, o que também foi observado na Figura 6a.

### 3.3. Labilidade de P

Em solo com teor inicial baixo de P, o P aplicado foi incorporado principalmente na fração moderadamente lábil (PML), indicando que boa parte do P aplicado não está disponível de forma imediata para as plantas. Apenas as fontes solúveis incrementaram o P lábil (PL), após três anos de adubação. Porém, para o SFT e SFS esse efeito foi significativo apenas quando a estratégia de adubação de cultura foi utilizada e em solo com baixo P (Figura 10a). Por outro lado, o Yookarin aumentou o PL em ambos solos testados nas duas estratégias de adubação (Figuras 10a e 11a), indicando ser uma fonte potencial para ser utilizada em sistemas integrados de produção, que utilizam adubação de sistema (Altmann, 2012).

De modo geral, em solos deficientes em P submetidos à altas doses de fertilizantes, o P aplicado acumula principalmente em frações inorgânicas lábeis e moderadamente lábeis (Rheinheimer, 2000; Gatiboni, 2003; Gatiboni et al., 2013; Soltangheisi et al., 2018). Em parte, o mesmo foi observado nesse estudo, em que o P se acumulou apenas nas frações PL e PML, não influenciando o P residual. Por outro lado, o P acumulou não apenas nas frações inorgânicas extraíveis, mas principalmente nas frações orgânicas em solo com baixo P (Figura 11b). As fontes solúveis aumentaram o P orgânico nos tratamentos Yookarin (sistema e cultura), SFT (cultura) e SFS (cultura) em 89% (média), 98% e 97%, respectivamente. Por outro lado, para a fração inorgânica, o uso de fontes solúveis proporcionou aumento apenas nos tratamentos com SFT (cultura) e SFS (cultura), ampliando em 293% e 440% o conteúdo de P dessas frações inorgânicas, respectivamente (Figura 6b). Proporcionalmente, dentro de cada fração, mais P foi incorporado à fração mineral do solo estudado, porém, em números absolutos, foi adicionado às frações orgânicas de P, em média, 407 mg dm<sup>-3</sup> de P quando do uso de fontes solúveis, o que corresponde a 69% de todo P acrescentado à todas as frações de P extraídas do solo, em relação ao tratamento controle.

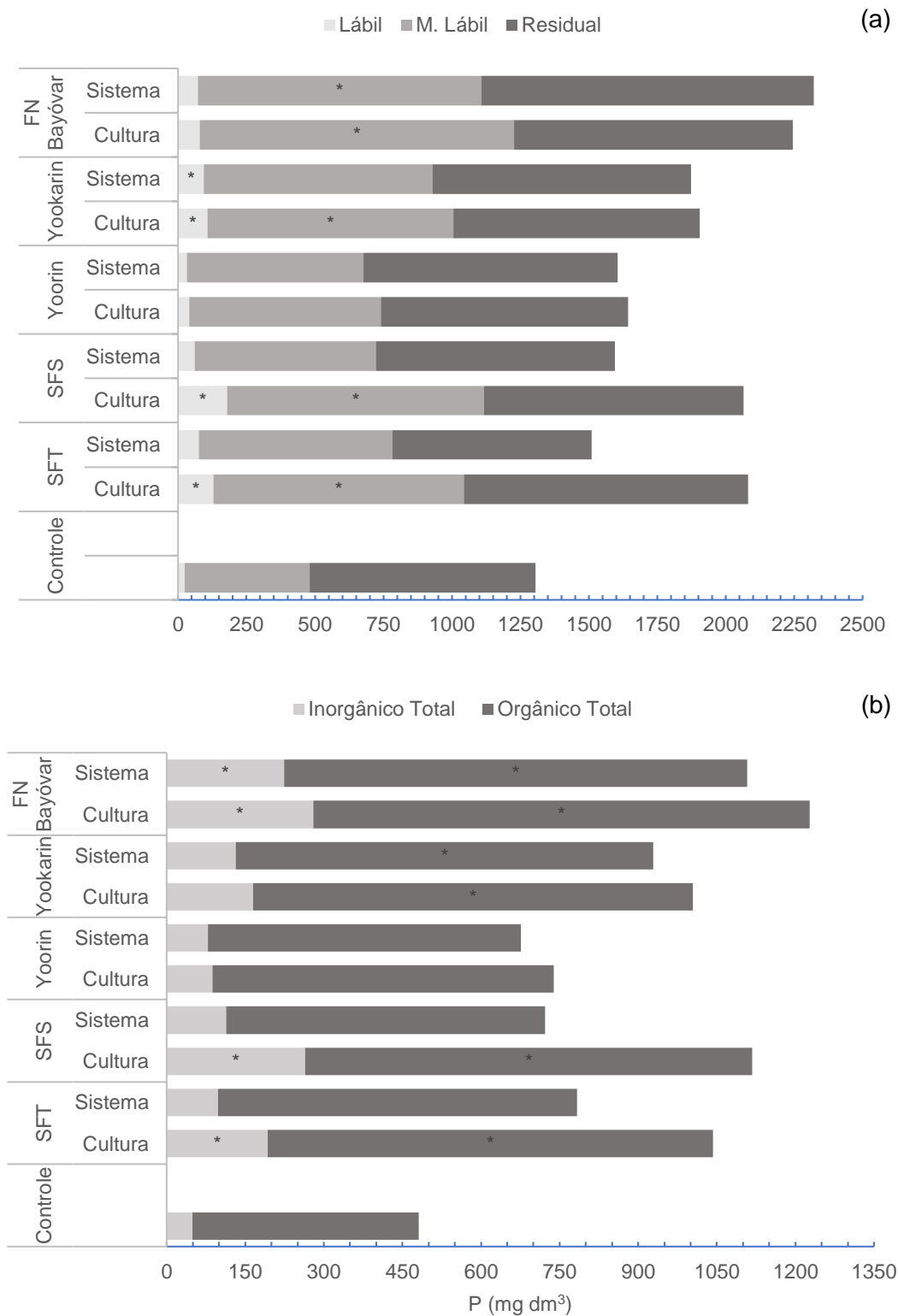
Em solo com baixo teor de P a maior parte do P adicionado ao solo por fontes solúveis, foi incorporado em frações orgânicas de moderada e baixa labilidade, estáveis no solo a médio e longo prazo. O que, de modo geral,

corroboram com os resultados relatados por Tiecher et al. (2018), em que o SPD favoreceu o aumento de frações orgânicas de P, indicando um melhor aproveitamento da adubação, aumentando as reservas de P no solo.

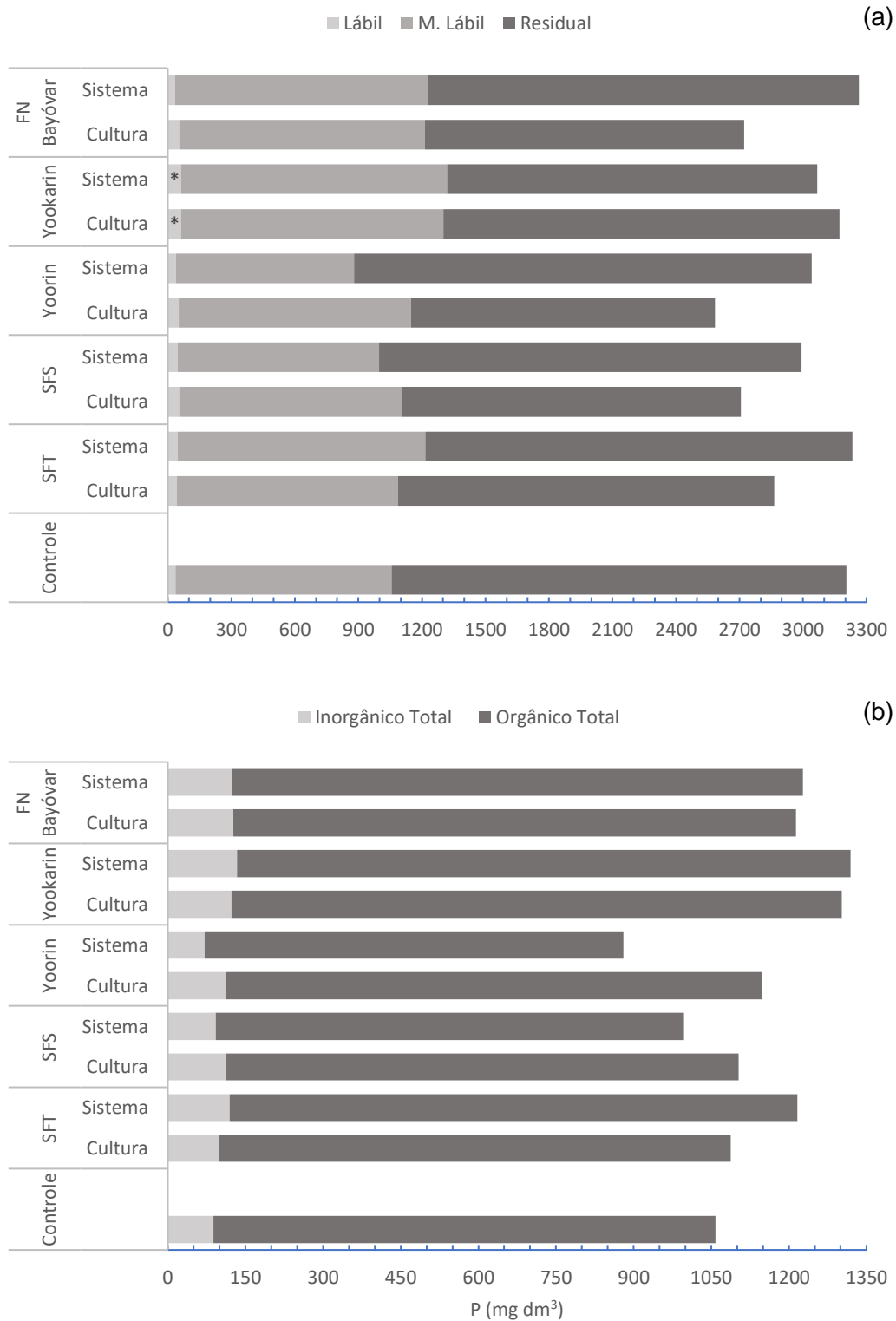
O aumento dos teores de Po em SPD sugere que formas orgânicas de P possam ter um importante papel na nutrição de plantas com P em SPD (Tokura et al., 2002, Bassamba et al., 2006, Bravo et al. 2006, Zamuner et al., 2008, Gatiboni et al., 2008). Diante disso, pode-se inferir que formas orgânicas de P podem representar uma fonte potencial de P em cultivos futuros, principalmente com diminuição ou supressão de adubação fosfatada (Withers et al., 2018).

No mesmo sentido, o aumento de P pelo uso do Bayóvar foi maior sobre a fração PML, porém, apenas para o solo com baixo P (Figura 10a). O Bayóvar aumentou o PML em ambas estratégias de adubação, o que se deve principalmente à presença de fosfato de Ca (P-Ca) nesse fertilizante, identificado na fração  $P_{HCl}$ , integrante do PML. O mesmo foi observado na Figura 9b em que apenas o Bayóvar aumentou o Pi e Po total extraível, para as duas estratégias de adubação, em relação à testemunha. Resultados semelhantes foram relatados por Soltangheisi et al. (2018), em que os autores associaram a maior proporção de PML quando do uso de FN, devido à presença de P-Ca no fertilizante. Isso porque a solução HCl  $1 \text{ mol L}^{-1}$  pode extrair parte do P ligado à apatita, além de outros compostos P-Ca pouco solúveis (Hedley, et al., 1982). Além disso, o aumento do Po total extraído desse solo, demonstra um aproveitamento semelhante às fontes solúveis do P aplicado como Bayóvar.

Por outro lado, em solo com médio P a adubação proporcionou pouca modificação quanto à labilidade (Figura 11a) e também não houve aumento nos teores de Po e Pi totais (Figura 11b). Dessa forma, como esperado, o maior teor de P e, conseqüentemente, uma menor dose aplicada, diminui o efeito da adubação fosfatada sobre o acúmulo de P no solo, uma vez que boa parte do P absorvido pelas plantas é fornecido pelo solo.



**Figura 10.** Distribuição de labilidade (a) e fósforo total extraível (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível baixo de P com aplicação de diferentes fontes de P em duas filosofias de adubação. [\*Difere do tratamento controle (Dunnett.  $P < 0,05$ ). M.Lábil (P moderadamente lábil)].



**Figura 11.** Distribuição de labilidade (a) e fósforo total extraível (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível médio de P com aplicação de diferentes fontes de P em duas filosofias de adubação. [\*Difere do tratamento controle (Dunnett.  $P < 0,05$ ). M.Lábil (P moderadamente lábil)].

#### 4. Conclusões

O uso de fontes solúveis é preferível durante a correção da disponibilidade de P, pois abastecem frações inorgânicas lábeis de P no solo de forma mais eficiente que fontes de parcialmente solúveis.

A correção da disponibilidade de P quando do uso de fontes solúveis é maior quando associado à adubação de cultura, principalmente em solos com baixo teor de P disponível.

As fontes solúveis aumentaram principalmente frações inorgânicas de P lábeis e de labilidade moderada ( $P_{RTA}$  e  $P_{bic}$ ) e frações orgânicas de labilidade moderada ( $P_{NaOH0.1}$ ). Já, a fonte parcialmente solúvel (Bayóvar) aumentou principalmente as frações de baixa labilidade, inorgânicas ( $P_{HCl}$ ), indicando que o P disponível em cada solo é abastecido de forma diferente por cada fonte.

Durante a correção dos teores de P, em termos absolutos, a maior parte do P adicionado foi acumulado em frações orgânicas de P de moderada labilidade. Porém, os maiores incrementos (em termos relativos) ocorreram nas frações inorgânicas.

## **CAPÍTULO V - Abastecimento de formas de P em Latossolo subtropical em SPD com teor alto de P por fosfatos de diferente solubilidade**

### **Resumo**

Em solos com alta disponibilidade de P a adubação fosfatada visa o reabastecimento do P exportado via colheita e possíveis perdas. Nesse estudo objetivou-se avaliar como diferentes fosfatos atuam no reabastecimento das frações de P em Latossolo bruno sob SPD de longa duração na região Centro-Sul do PR. O experimento seguiu um delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial duplo com tratamento adicional ( $2 \times 5+1$ ), com três repetições. Uma dose anual de  $115 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  foi aplicada utilizando cinco fosfatos [três solúveis (SFT, SFS e Yookarin) e dois de moderada solubilidade (Yoorin e Bayóvar)], em duas estratégias de adubação (Cultura e Sistema), mais um tratamento controle sem adubação fosfatada. Após três anos foram coletadas amostras de 0-10 cm de profundidade que foram submetidas ao fracionamento químico sequencial de P proposto por Hedley et al. (1982). Todas as fontes utilizadas reabasteceram formas de P lábeis e de moderada labilidade, mantendo a disponibilidade alta, sem praticamente efeito da estratégia de adubação. Em Latossolos com alto teor de P e em SPD todas as fontes podem ser utilizadas para a manutenção da disponibilidade de P em ambas as estratégias de adubação.

**Palavras chave:** Fosfato natural, adubação de sistema, labilidade do fósforo.

## 1. Introdução

Latossolos são solos altamente intemperizados altamente representativos de regiões tropicais e subtropicais (Yang e Post, 2011). No Brasil, os Latossolos correspondem a mais de 60% da área, apresentando grande limitação de P devido à alta capacidade de adsorção específica desse elemento (Fink et al., 2016). Portanto, um grande aporte de P via fertilizantes é necessário para manter níveis economicamente viáveis de produção agrícola (Ker, 1997; Novais e Smyth, 1999; Motta et al., 2002; Almeida et al., 2003).

No Centro-Sul do Paraná, região de abrangência da Cooperativa Agrária, predominam Latossolos brunos e Nitossolos, os quais se caracterizam pelos altos teores de óxido de Fe e Al. Nessa região, praticamente a totalidade da área é manejada no sistema plantio direto (SPD), o qual apresenta uma série de benefícios quanto a conservação do solo e da água (Sá et al., 2009), da qualidade física, química e biológica do solo (Slam e Reeder, 2014) e, determina uma maior eficiência dos fertilizantes fosfatados (Ciotta et al., 2002; Fontoura et al., 2015). Isso se deve ao fato de que o não revolvimento do solo no SPD diminui o contato dos fertilizantes com os colóides do solo e o maior aporte de resíduos promove a adição de matéria orgânica ao solo, que contribui para o aumento de formas lábeis de P, diminuindo a adsorção de P, com reflexos positivos na disponibilidade deste nutriente às culturas (Rheinheimer e Anghinoni, 2001; Rheinheimer et al., 2008; Fink et al., 2016).

A camada superficial do solo em SPD acumula P em formas inorgânicas (Pi) e orgânicas (Po) com diferentes graus de energia de ligação (Rheinheimer e Anghinoni, 2001). Muitos estudos tem demonstrado que o P adicionado pelos fertilizantes se acumula principalmente em formas Pi extraídas com NaOH, as quais são associadas aos óxidos de Fe e Al e consideradas de moderada labilidade (Rheinheimer e Anghinoni, 2001; Conte et al., 2003; Kuo et al., 2005; Gatiboni et al., 2007; Gatiboni et al, 2008; Takeda et al., 2009; Vu et al., 2010; Wang et al., 2010, Rodrigues et al., 2016). Além das frações lábeis de P, as frações de moderada labilidade também atuam no suprimento de P às culturas (Gatiboni et al., 2013).



Tiecher et al. (2018) relatam que em SPD a maior parte do P disponível ( $P_{RTA}$ ) foi abastecido por frações  $P_i$  moderadamente lábeis.

No manejo da adubação objetiva-se a máxima eficiência do nutriente aplicado a fim do maior retorno econômico. Nesse sentido, a maioria dos manuais de adubação recomendam a adubação de cultura, uma vez que, aplicar P a cada cultivo mostrou-se mais rentável, com maior retorno produtivo por quilograma de P aplicado, principalmente em situação de deficiência de P (Leikam et al., 2003; Mallarino, 2009). Mas, em sistemas conservacionistas como o SPD consolidado, com rotação de culturas e contínua ciclagem do P dos resíduos vegetais que auxilia no suprimento contínuo de P às culturas, estratégias de adubação de sistema, em que o P é aplicado uma única vez na cultura de maior exigência apresenta eficiência similar à adubação a cada cultivo (Nicolodi et al., 2017), mas determina uma maior operacionalidade do sistema produtivo (Altmann, 2012; Fontoura et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016).

Dessa forma, em solos com fertilidade construída manejados em SPD consolidado, o efeito da adubação fosfatada pode ser diferente da adubação de correção. Espera-se que a distribuição nas frações de P no solo do P proveniente da adubação seja influenciada pelos benefícios do SPD, que podem intensificar o efeito dos fosfatos solúveis e/ou parcialmente solúveis sobre a disponibilidade de P. Nesse sentido, o fracionamento proposto por Hedley et al. (1982) pode facilitar o entendimento do efeito das fontes, da estratégia de adubação e do SPD em ambiente de alta disponibilidade de P.

Os objetivos do presente estudo foram avaliar como fosfatos de diferente solubilidade promovem o reabastecimento de formas orgânicas e inorgânicas de P de diferente labilidade em Latossolo subtropical com alta disponibilidade de P em SPD.

## 2. Material e métodos

### 2.1. Descrição do local de estudo e delineamento experimental

O estudo foi conduzido em Latossolo Bruno alumínico (Embrapa, 2016) com teor inicial de P alto (Tabela 15), localizado na estação experimental da Fundação de Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), Guarapuava, região Centro-Sul do Paraná. O experimento consistiu na aplicação de cinco fontes de P e de duas estratégias de adubação (Cultura e Sistema), cuja distribuição a campo seguiu um delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial com tratamento adicional (5x2+1), em três repetições.

**Tabela 15. Caracterização das fontes e doses utilizadas e caracterização química inicial do Latossolo Bruno alumínico (Camada 0-10 cm).**

Fonte	Classificação	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		Dose
		total	solúvel <sup>1</sup>	
Sem P	-	-	-	-
SFT	Solúvel	46	45	256
SFS	Solúvel	21	19	605
Yookarin	Solúvel	36	27	407
Yoorin	Solub. Moderada	17	16	688
Bayóvar	Solub. Moderada	29	10	786

Argila	COT	pH	P <sup>2</sup>	K	Al	Ca	Mg	T	V	m
-----g kg <sup>-1</sup> -----			mg dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			-----%----	
500	27	5,4	11,2	0,3	0,2	6,9	2,4	16	66	2

<sup>1</sup> Citrato neutro de amônio + Água. <sup>2</sup> Mehlich 1. COT (Carbono Orgânico Total); T (Capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0); V (Saturação por bases na T); m (Saturação por Al na CTC efetiva)

A dose de 115 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Fontoura et al., 2015) foi aplicada na linha de semeadura utilizando três fontes solúveis (Super Fosfato Triplo - SFT, Super Fosfato Simples – SFS, Yookarin) e duas fontes de solubilidade moderada (Yoorin e Fosfato Natural Bayóvar). Na estratégia de adubação por cultura, 50% da dose foi aplicada 50% na cultura de inverno e 50% na cultura de verão. Na estratégia de adubação de sistema, a dose foi aplicada integralmente na semeadura da cultura de inverno. Essa adubação foi realizada por três anos consecutivos até o momento

da coleta das amostras de solo. As fontes de P utilizadas e quantidade aplicada de cada fertilizante são caracterizadas na Tabela 15.

## 2.2. Amostragem do solo e fracionamento químico sequencial de P

As amostras de solo foram coletadas em triplicata na camada de 0-10 cm de profundidade. Posteriormente foram secas a 50°C, moídas, peneiradas a 2 mm e armazenadas.

As frações de P do solo foram determinadas de acordo com metodologia descrita por Hedley et al. (1982), com modificações feitas por Rheinheimer (2000). As formas de P foram sequencialmente extraídas pelos seguintes extratores: resina de troca aniônica (RTA) (2,5 cm<sup>2</sup>) (placas AR 103 QDP 434) (Pi); NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> à pH 8,5 (Pi e Po); NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (Pi e Po); HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> (Pi); NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> (Pi e Po). Todos os extratores permaneceram em contato com a amostra durante 16 horas em agitador tipo 'sem fim' (33 rpm), com posterior centrifugação a 3500 rpm por 15 minutos. Nos extratos alcalinos de NaHCO<sub>3</sub> e NaOH, o P total foi estimado por digestão com persulfato de amônio e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> em autoclave a 121°C (USEPA, 1971), e posterior determinação do P conforme metodologia de Murphy e Riley (1962). O Pi desses extratos foi determinado pelo método de Dick e Tabatabai (1977). O Po obtido pela diferença entre P total e o Pi dos extratos alcalinos. O P extraído pela RTA e NaHCO<sub>3</sub> (P<sub>bic</sub> e P<sub>bic</sub>) foi considerado lábil e o extraído pelo NaOH moderadamente lábil. O P residual foi considerado não-lábil. O P residual e total foi estimado por digestão com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> na presença de MgCl<sub>2</sub> saturado (Olsen e Sommers, 1982). A estimativa do Po total foi feita pela soma das frações orgânicas (P<sub>bic</sub>, P<sub>NaOH0.1</sub> e P<sub>NaOH0.5</sub>) e o Pi total pela soma das frações inorgânicas (P<sub>RTA</sub>, P<sub>bic</sub>, P<sub>NaOH0.1</sub>, P<sub>HCl</sub> e P<sub>NaOH0.5</sub>).

## 2.3. Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos à análise de variância ao nível de 5% e, quando significativo, a diferença entre médias de tratamentos foi avaliada pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância. O esquema fatorial duplo com

tratamento adicional é representado por:  $A \times B + 1$ , em que A representa o primeiro fator com i níveis ( $i = 1, 2, 3 \dots a$ ) e B representa o segundo fator com j níveis ( $j = 1, 2, 3 \dots b$ ) com adição do tratamento adicional. Para os resultados de labilidade, os tratamentos foram comparados com o controle pelo teste de Dunnett ao nível de 5% de significância. Para análise de todos os tratamentos em conjunto foi utilizada uma análise de componentes principais (ACP) e posterior análise de agrupamentos por soma de quadrados (Ward), utilizando o programa MULTIV 3.5b.

### 3. Resultados e discussão

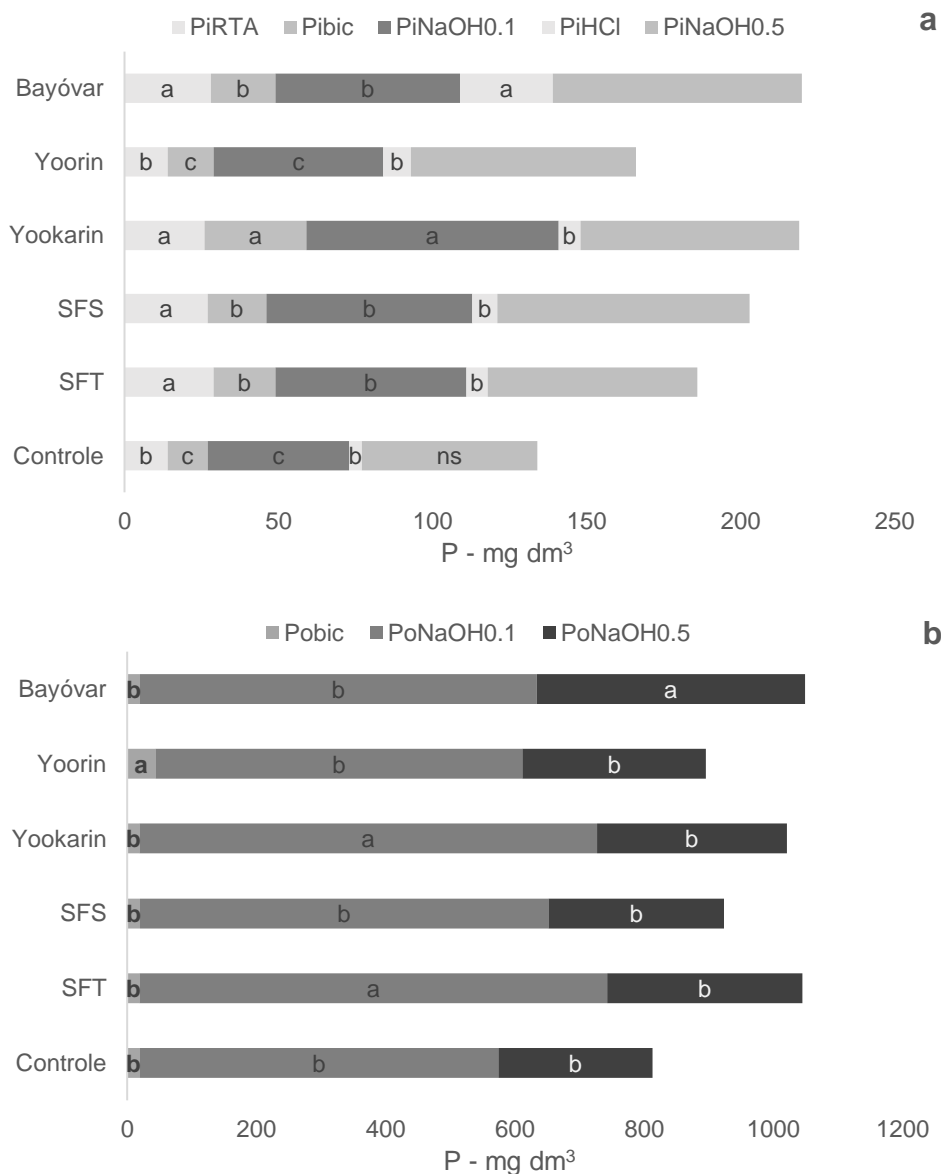
#### 3.1. Fosfatos com diferente solubilidade

Os fosfatos solúveis abasteceram frações inorgânicas e orgânicas de P (Figura 12). Neste solo com alto teor de P, as fontes solúveis (SFT, SFS e Yookarin) aumentaram, em média, 13, 11 e 24 mg dm<sup>3</sup> as frações inorgânicas  $P_{RTA}$ ,  $P_{i_{bic}}$  e  $P_{i_{NaOH0.1}}$ , respectivamente, em relação ao tratamento controle sem adubação. Dentre as fontes solúveis o uso do Yookarin promoveu o maior aumento nessas frações ( $P_{RTA}$ ,  $P_{i_{bic}}$  e  $P_{i_{NaOH0.1}}$ ), indicando que o P adicionado na forma de Yookarin está abastecendo as frações lábeis de P no solo ( $P_{RTA}$  e  $P_{i_{bic}}$ ) (Figura 1a) (Hedley et al., 1982; Tiessen e Moir, 1993), bem como está sendo transferido e/ou quimiosorvido em frações com labilidade moderada que apresentam maior energia de interação ( $P_{i_{NaOH0.1}}$ ). Além disso, o P aplicado por meio das fontes solúveis SFT e Yookarin também aumentaram em 160 mg dm<sup>3</sup>, em média, o teor de  $P_{O_{NaOH0.1}}$  em relação ao tratamento controle (Figura 12b). Isso indica que o P oriundo dessas fontes solúveis também está sendo incorporado a frações orgânicas de labilidade moderada, associadas provavelmente às frações húmicas em interação com as superfícies minerais (Hedley et al., 1982; Condon et al., 1985; Linquist et al., 1997).

Assim como observado para as fontes solúveis, o uso do Bayóvar também aumentou o P das frações  $P_{RTA}$ ,  $P_{i_{bic}}$  e  $P_{i_{NaOH0.1}}$  em relação ao tratamento controle (Figura 12a), o que não ocorreu com o Yoorin. Dessa forma, o Bayóvar mostrou-se uma alternativa às fontes solúveis em situação de suficiência de P (acima do NC). Além disso, o uso do Bayóvar resultou num maior teor de  $P_{i_{HCl}}$ , o que era esperado,

uma vez que os fosfatos naturais são constituídos principalmente por compostos P-Ca como as apatitas (Soltangheisi et al., 2019), e devido à baixa solubilidade, especialmente em solos com alto teor de P, Ca e alto pH, possui alto poder residual em solos de fertilidade construída (Barreto et al., 2018). Características físico-químicas, granulometria, e menor solubilidade, favorecem a disponibilização gradual do P com a intemperização das apatitas, o que, a longo prazo, não compromete o aproveitamento do P aplicado e/ou sua distribuição para outras frações no solo (Faria e Guardieiro, 2011). Da mesma forma, Tiecher et al. (2018) relataram que em SPD a maior parte do P disponível ( $P_{RTA}$ ) foi abastecido por frações inorgânicas, demonstrando que o  $P_o$  atua com menor intensidade no suprimento de P as plantas, sendo protegido com a MO em sistemas conservacionistas como o SPD. Além disso, assim como observado no estudo II, o aumento observado na fração  $P_{ONaOH0.5}$ , se deve a superestimação do  $P_o$  pelo método de fracionamento (Tiecher et al., 2021).

Por outro lado, a fração inorgânica oclusa de P ( $P_{iNaOH0.5}$ ) (Condrón et al., 1985; Linquist et al., 1997), não foi influenciada pelo P aplicado através das fontes com diferentes solubilidade, tão pouco pela estratégia de adubação (Figura 13), sinalizando que o P aplicado ao solo ainda não está sendo adsorvido na forma  $P_i$  com alto grau de energia. O não reabastecimento dessa forma inorgânica de P mais estável pode ser decorrente da modificação da dinâmica do P no solo em SPD, onde a maior presença de ácidos orgânicos de baixo peso molecular pode competir com os sítios de sorção de fosfato, diminuindo a sorção do  $PO_4^-$  (Fink et al., 2016).



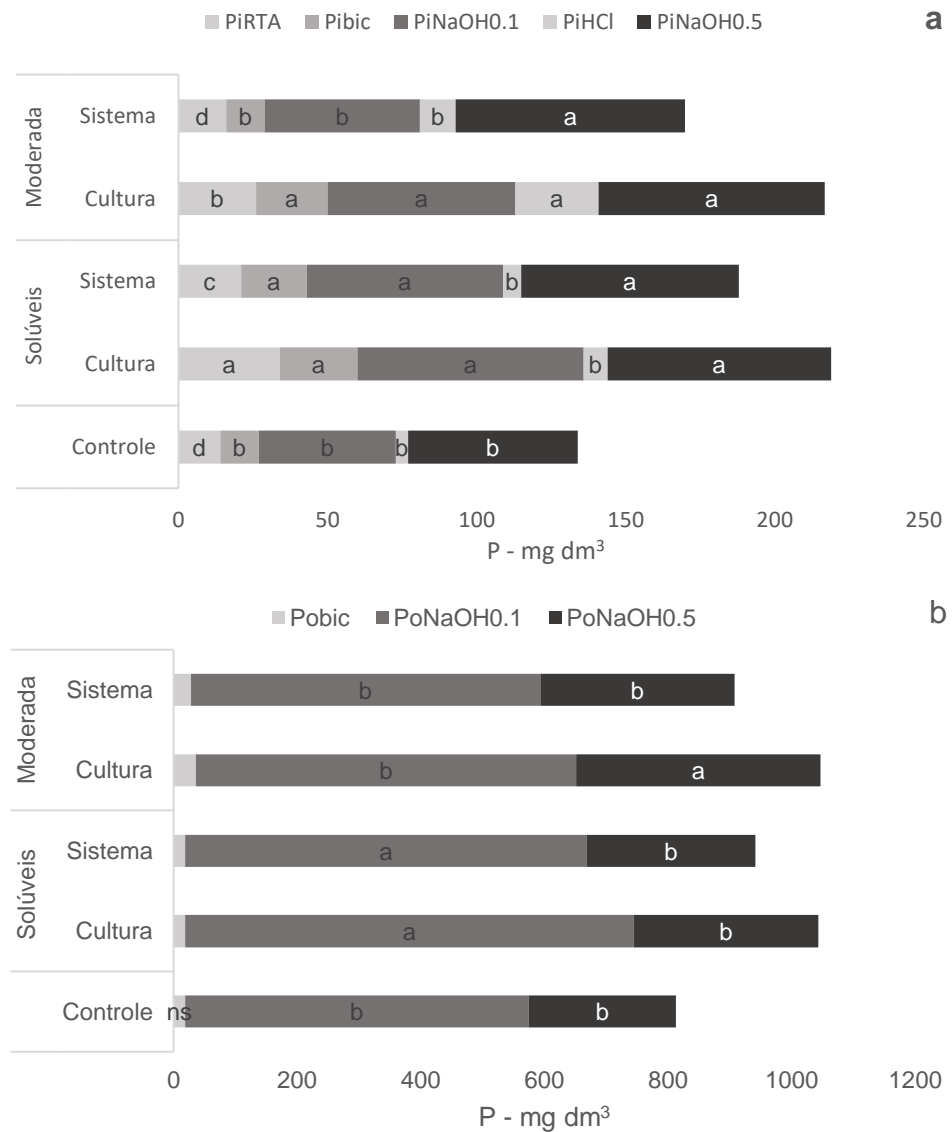
**Figura 12.** Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível alto de P (Guarapuava – PR) sob aplicação de diferentes fontes de P. [Barras seguidas de mesma letra dentro de cada fração, as médias não diferem entre si (Scott-Knott  $p < 0,05$ )].

O termofosfato Yoorin foi a única fonte que aumentou  $P_o$  extraído com  $\text{NaHCO}_3$  (Figura 12a). Dentre as fontes utilizadas nesse estudo o Yoorin é a única que contém Si em sua composição (aproximadamente 10%), o que pode influenciar nas reações do P no solo pois, com o aumento no teor de silicato no solo, ocorrem reações de troca entre o silicato e fosfatos. Desta forma, há a formação de silicatos de cálcio, alumínio e ferro, por exemplo, com a liberação do íon fosfato dos sítios dos óxidos, aumentando o teor de P na solução do solo (Lima Filho, 2006). Estudos indicam, também, a possibilidade de o Si aumentar a translocação interna do P para a parte aérea da planta (Savant, 1997; Takahashi, 1995; Epstein, 1999). Dessa forma o P proveniente do Yoorin pode estar ciclando mais rapidamente que o das demais fontes permanecendo em frações orgânicas mais lábeis como  $P_{o\text{bic}}$ , uma vez que, não foram observadas modificações nas demais frações orgânicas de P.

### 3.2. Estratégia de adubação

A estratégia de adubação modificou a ação das fontes utilizadas sobre frações inorgânicas de P, e foi mais relevante quando do uso de fontes de moderada solubilidade (Figura 13a). Aplicar a dose em cada cultivo (adubação de cultura) proporcionou maior teor de  $P_{\text{RTA}}$  para ambas as fontes (solúveis e de solubilidade moderada). Porém, o uso de fontes de solubilidade moderada reabasteceu com menor eficiência frações de P de menor labilidade como  $P_{\text{bic}}$ ,  $P_{\text{NaOH}0.1}$  e  $P_{\text{HCl}}$  quando a adubação de sistemas foi utilizada. Dessa forma, mesmo acima do NC o reabastecimento das frações de P do solo pela aplicação de FN e/ou termofosfato foi maior quando a adubação de cultura foi utilizada.

A estratégia de adubação não influenciou a ação dos fosfatos utilizados sobre o  $P_o$  de alta labilidade ( $P_{o\text{bic}}$ ) e  $P_o$  moderadamente lábil ( $P_{o\text{NaOH}0.1}$ ) (Figura 13b). Porém, quando do uso de fontes de menor solubilidade, a adubação de cultura aumentou a fração  $P_o$  menos disponível ( $P_{o\text{NaOH}0.5}$ ), protegida por interações físico-químicas (Hedley et al., 1982), sugerindo que a adubação de cultura associada ao SPD contribuiu para o melhor aproveitamento do P aplicado e conseqüentemente, o aumento do estoque de fósforo orgânico do solo.

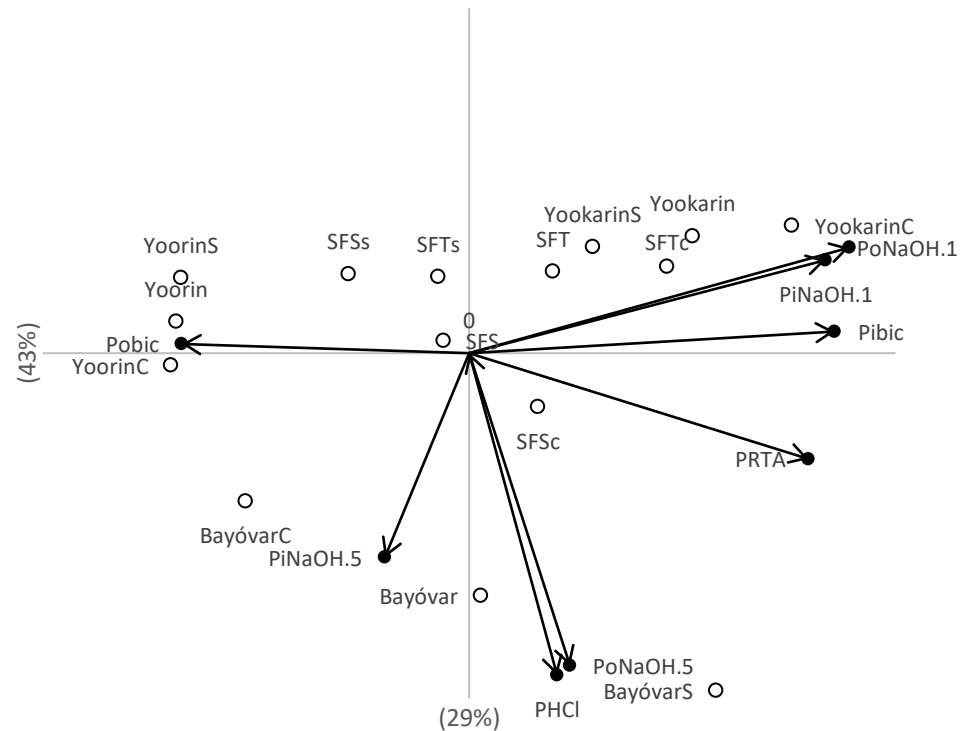


**Figura 13.** Distribuição de frações de fósforo inorgânico (a) e orgânico (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível alto de P (Guarapuava – PR) sob aplicação de fontes de P solúveis e de moderada solubilidade em duas estratégias de adubação. [Barras seguidas de mesma letra dentro de cada fração, as médias não diferem entre si (Scott-Knott  $p < 0,05$ )].



A ACP explicou 72% da variação de todos os tratamentos utilizados no estudo, sendo 43% ao longo do eixo 1 (Figura 14). As frações  $P_{\text{bic}}$ ,  $P_{\text{bic}}$ ,  $P_{\text{NaOH}0.1}$  e  $P_{\text{NaOH}0.1}$  foram melhor explicadas pelo eixo 1 e as frações  $P_{\text{NaOH}0.5}$ ,  $P_{\text{NaOH}0.5}$  e  $P_{\text{HCl}}$  pelo eixo 2. A ACP confirma a alta relação dos tratamentos com Yoorin com a fração  $P_{\text{bic}}$ , e dos tratamentos com Bayóvar com as frações  $P_{\text{HCl}}$  e  $P_{\text{NaOH}0.5}$ , indicando que fontes de moderada solubilidade interagem com as frações de P do solo de forma diferente. Já os fosfatos solúveis apresentaram comportamento similar entre si, não estando associados a uma fração específica de P mas sim reabastecendo todas as frações de P do solo.

Os resultados indicam que a partir da correção do solo em SPD o efeito da estratégia de adubação sobre as frações de P do solo é menor e/ou inexistente, o que pode ser observado na análise de agrupamentos. A análise de agrupamentos identificou 5 grupos nítidos, sendo formados cada um pelas 5 fontes utilizadas (Tabela 16). Dessa forma, a análise de agrupamentos conseguiu identificar o efeito de cada fonte, porém não foi observado diferença entre as estratégias de adubação. O Latossolo Bruno utilizado no estudo favorece a adsorção do P aos colóides, apresentando aproximadamente 470 g  $\text{kg}^{-1}$  de óxidos de Fe e Al (com 56 g  $\text{kg}^{-1}$  de goethita e 400 g  $\text{kg}^{-1}$  de gibbissita) na fração argila (610 g  $\text{kg}^{-1}$ ) (Inda Junior et al., 2007). Porém, após a correção da disponibilidade de P em SPD consolidado a labilidade do P é maior, pois com o não revolvimento do solo, controle da erosão e a manutenção da cobertura vegetal do solo, podem diminuir a formação de complexos de esfera interna de alta energia do P com a fases sólida do solo (Marcolan, 2006; Rheinheimer et al., 2008; Fink et al., 2016). Desse modo, com menos sítios expostos, a disponibilidade de P às plantas também é favorecida pois o contato do P com o solo fica limitado a uma camada menor (superficial), o que associado a menor energia de ligação P-solo diminui a importância da estratégia de adubação no manejo da adubação fosfatada.



**Figura 14.** Análise de componentes principais (PCA) de frações de fósforo inorgânico e orgânico na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível alto de P sob aplicação de fontes de P solúveis e de moderada solubilidade em duas estratégias de adubação. [SFTc (SFT cultura); SFTs (SFT sistema); SFSc (SFS cultura); SFSS (SFS sistema) YookarinC (Yookarin cultura); YookarinS (Yookarin sistema); YoorinC (Yoorin cultura); YoorinS (Yoorin sistema); BayóvarC (Bayóvar cultura); BayóvarS (Bayóvar sistema)].

**Tabela 16. Análise de agrupamento hierárquico (Ward) dos tratamentos em Latossolo bruno com teor inicial alto de P.**

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
SFT	SFS	Yookarin	Yoorin	Bayóvar
SFTs	SFSs	YookarinS	YoorinS	BayóvarS
SFTc	SFSc	YookarinC	YoorinC	BayóvarC

### 3.3. Labilidade de P

Todos os fertilizantes utilizados aumentaram a fração lábil de P quando a adubação foi feita em cada cultura (Figura 15a). Os resultados indicam que devido à grande capacidade de fixação de fosfato do solo em estudo, parcelar a adubação mantém o P em frações mais disponíveis por mais tempo. Além disso, o não revolvimento do solo diminui a exposição dos fertilizantes a reações de

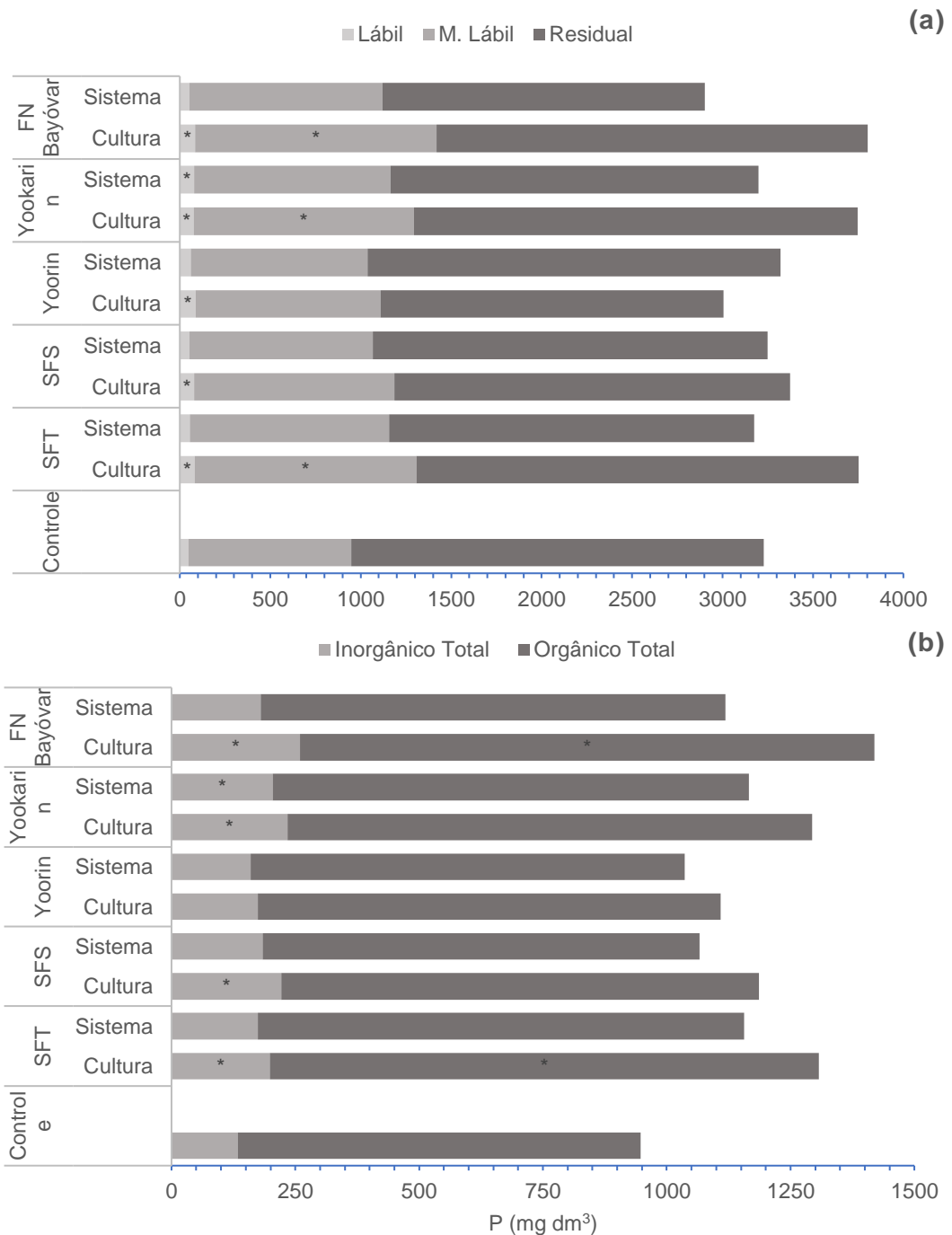
sorção de alta afinidade pelo fosfato e a maior presença de compostos orgânicos de baixo peso molecular em SPD podem bloquear parte dos sítios de adsorção, aumentando o P lábil (Hue, 1991, Rheinheimer e Anghinoni, 2001; Redel et al., 2007; Zamuner et al., 2008; Rheinheimer et al., 2008; Fink et al., 2016).

Por outro lado, Rodrigues et al. (2016) relataram que 70 a 85% do P adicionado foi convertido a formas moderadamente lábeis e não lábeis associadas a óxidos de Fe e Al, e não em formas disponíveis de plantas. O que corrobora com nossos resultados, em que o maior aumento se deu na fração moderadamente lábil de P, principalmente quando da utilização das fontes SFS, Yookarin e FN Bayóvar associada a adubação de cultura. Os resultados indicam que o P aplicado está sendo preferencialmente adsorvido na superfície de óxidos de Fe e Al e/ou formando fosfato monoéster parcialmente hidrolisado, que possui uma elevada capacidade de complexação com partículas do solo, resultando em baixa acessibilidade ao ataque microbiano e na formação de complexos Fe-P com substâncias húmicas (Tiessen e Moir, 1993, Rheinheimer et al., 2002, Redel et al. 2007).

Após três anos, em solo com teor alto de P, as maiores modificações foram observadas na fração  $P_i$  extraído pelo fracionamento (Figura 15b). Quando da adubação de cultura, as fontes SFT, SFS, Yookarin e FN Bayóvar, aumentaram o  $P_i$  em relação a testemunha, enquanto apenas o SFT e o FN Bayóvar proporcionaram maiores teores de  $P_o$ . Dessa forma, mesmo num cenário de alta disponibilidade de P boa parte do P adicionado acumulou-se em frações inorgânicas de moderada labilidade (Rheinheimer, 2000; Gatiboni, 2003; Gatiboni et al., 2013; Soltangheisi et al., 2018), porém a disponibilidade de P não foi afetada, indicando que a fração lábil/disponível pode estar sendo tamponada pelas frações  $P_i$  menos lábeis.

Não foi observado aumento no P residual pela aplicação de P ao solo por nenhuma das fontes utilizadas no estudo (Figura 15a). Porém, com exceção ao Yoorin todas as fontes proporcionaram aumento nos teores P total extraível (orgânico e inorgânico) (Figura 15b), indicando que o P adicionado não foi transferido para frações não-lábeis, o que se deve ao curto período (três anos) e/ou pelo pouco excedente de P; uma vez que, a dose aplicada foi apenas de manutenção e produção. Além disso, por se tratar da camada superficial do solo

(0-10 cm), os resultados podem ser atribuídos a aplicação localizada dos fertilizantes e deposição dos resíduos de cultura no SPD (Tiecher et al., 2012a).



**Figura 15.** Distribuição de labilidade (a) e fósforo total extraível (b) na camada de 0-10 cm de um Latossolo Bruno com nível alto de P com aplicação de diferentes fontes de P em duas filosofias de adubação. [\* Difere do tratamento controle (Dunnett.  $P < 0,05$ ). M.Lábil (P moderadamente lábil)].

Nesse cenário a adubação associada a adição de matéria orgânica ao solo em SPD contribuem para o aumento de formas mais lábeis de P, com diminuição da adsorção e consequente aumento da disponibilidade de P para as plantas (Andrade et al., 2003; Rodrigues et al., 2016). Assim sendo, o  $P_o$  e  $P_i$  podem agir como fonte ou dreno do P disponível dependendo de condições edafoclimáticas, manejo do solo e adubação (Rheinheimer et al., 2008, Tiecher et al., 2012a, Tiecher et al., 2012b). Podendo nessas condições a disponibilidade de P ser maior devido a contribuição de frações inorgânicas lábeis (Zamuner et al., 2008) e até mesmo moderadamente lábeis (Tiecher et al. 2018).

#### **4. Conclusões**

Todas as fontes aumentaram os teores de P lábil do solo em estudo. Assim sendo, o manejo da adubação fosfatada acima do nível crítico de P em SPD pode ser realizado com qualquer uma das fontes de P utilizadas nesse estudo.

A adubação de cultura favoreceu o aumento nos teores de P na maioria das frações avaliadas, indicando ser preferível quando se objetiva aumentar a disponibilidade e/ou o estoque de P do sistema. Porém a adubação de sistema manteve os teores de P acima do nível crítico não comprometendo a disponibilidade.

O P aplicado na forma de Yoorin não foi transferido para frações mais recalcitrantes de P no SPD, permanecendo em frações orgânicas lábeis, indicando um menor efeito residual dessa fonte.

A maioria do P adicionado foi incorporado a frações inorgânicas de P de moderada labilidade, porém, aumento na fração  $P_o$  também foi observado quando do uso SFT e FN Bayóvar.

## **CAPÍTULO VI - Contribuição das frações P no suprimento de P para as culturas em Latossolos em plantio direto com diferentes níveis de P e sob aplicação de fosfatos com diferente solubilidade**

### **Resumo**

Utilizando a análise de caminhos combinada com o fracionamento químico sequencial do P no solo, avaliamos a contribuição das formas disponíveis e das reservas de P do solo para a absorção de P da planta em dois Latossolos cultivados a longo prazo, sob aplicação de fosfato solúvel e natural. Dois experimentos de campo foram estabelecidos em 2014 no Paraná (Sul do Brasil), em solos com baixo ( $<4 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e alto ( $8-16 \text{ mg dm}^{-3}$ ) de teor de fósforo disponível no solo. As doses recomendadas de P ( $350$  e  $115 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , para experimentos de P baixo e alto disponíveis, respectivamente) foram aplicadas usando o superfosfato SFT e Bayóvar, além de outro tratamento sem fertilização (controle). O rendimento de cereais de inverno e soja foi avaliado por três anos, quando o solo foi amostrado na camada de 0 a 10 cm e o tecido da planta na fase de floração. As amostras de solo foram submetidas ao fracionamento químico sequencial de P, conforme proposto por Hedley et al. (1982), o tecido vegetal foi avaliado em relação ao P na biomassa da parte aérea ( $P_{\text{abs}}$ ) e os resultados foram submetidos à análise de caminhos para estimar a contribuição de cada fração P do solo para o  $P_{\text{abs}}$ . No solo sem adubação, todas as frações inorgânicas de P contribuíram para os  $P_{\text{abs}}$ , mas a maioria dos  $P_{\text{abs}}$  foi fornecida pelo P orgânico extraído por  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . A adubação com ambas as fontes no solo com baixo P disponível aumentou a contribuição das frações inorgânicas de P extraídas em  $\text{NaHCO}_3 0,5 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$  e diminuiu a contribuição das frações orgânicas de P, diferentemente do solo controle sem P. A aplicação do fosfato natural Bayóvar no solo com baixo P disponível, aumentou a contribuição do P inorgânico extraído pelo HCl para o  $P_{\text{abs}}$ . Em solo com alto teor inicial de P disponível, o suprimento de P às plantas ( $P_{\text{abs}}$ ) foi semelhante entre as frações de P do solo, utilizando ambas as fontes de fosfato, mas sem favorecer a liberação direta de frações orgânicas e inorgânicas de menor labilidade, diminuindo a contribuição das reservas de P do solo. Assim, manter as reservas de P do solo pode diminuir a dependência de altas doses de fosfatos em futuras culturas e, conseqüentemente, minimizar os custos e o risco ambiental da fertilização com fosfato no plantio direto, sem restrição no rendimento das culturas.

**Palavras-chave:** adubação fosfatada, análise de caminhos, fracionamento químico de P.

## 1. Introdução

Os Latossolos tropicais e subtropicais fortemente intemperizados são conhecidos pela sua alta capacidade de adsorver P. Para a construção da fertilidade nesses solos, são necessárias altas doses de fertilizantes fosfatados. Os sítios mais ávidos de sorção de P do solo adsorvem o elemento com maior energia, e à medida que esses vão sendo saturados, o P é retido com menor energia, e mais disponível para as plantas (Rodrigues et al., 2016; Soltangheisi et al., 2018). Com o passar dos cultivos e das fertilizações, há um incremento na disponibilidade de P e também nas reservas de P no solo, menos disponíveis (Withers et al., 2018).

Em sistemas conservacionistas como o SPD, o não revolvimento do solo e acúmulo de resíduos na superfície promovem aumento nas formas de P orgânico (Po) (Rodrigues et al., 2016). Porém a contribuição de frações orgânicas de P ao suprimento de P às plantas ainda é pouco conhecida. Além disso, a matéria orgânica reduz a adsorção do P nos grupos de superfície de óxidos de Fe e Al (Fink et al., 2016), principalmente na camada superficial de solos em SPD. Por sua vez, a calagem superficial associada ao uso de elevadas doses de P podem resultar na neoformação de fosfatos de Ca, transformando o P solúvel aplicado em formas não disponíveis para as plantas (Rheinheimer, 2000; Gatiboni et al., 2007). A interação entre as frações de P em SPD é complexa, sendo influenciada pelas reservas de P acumuladas ao longo dos cultivos em SPD, bem como pelo tipo de fosfato aplicado ao solo (Gatiboni et al., 2013).

O superfosfato triplo (SFT) é um fosfato solúvel de alta concentração de P utilizado como referência em vários trabalhos de adubação fosfatada (Faria e Guardieiro, 2011; Moreira et al. 2014; Silva et al. 2014; Santos, 2016; Barreto et al., 2018). Fontes de menor solubilidade como os termofosfatos e fosfatos naturais (FN) são considerados de menor eficiência agrônômica (EA). Porém, em solos de fertilidade construída, com teor de P no solo acima do teor crítico, fontes de menor solubilidade podem ser uma alternativa, visando a reposição da reserva de P no solo devido a seu efeito residual prolongado (Sousa et al., 2010). Dessa forma, cada fonte interage com o sistema solo-planta de forma particular,

e o resultado dessa interação irá determinar a disponibilidade de P para a cultura e o reabastecimento da reserva de P do solo.

Os fosfatos solúveis promovem incremento imediato no teor de P disponível logo após a aplicação no solo (Soltangheisi et al., 2018). Por sua vez, a conversão do P em formas indisponíveis, a longo prazo, é maior quando se utiliza fontes solúveis do que fontes de baixa solubilidade, o que, ao menos em parte, é decorrente da liberação lenta do nutriente do FN (Soltangheisi et al., 2018). A adubação fosfatada promove acúmulo de P no solo em frações inorgânicas ( $P_i$ ) de moderada labilidade (Rheinheimer, 2000; Gatiboni, 2003; Gatiboni et al., 2013; Soltangheisi et al., 2018). No entanto, existem algumas particularidades; o uso de fontes solúveis geralmente abastece frações de moderada labilidade associadas aos óxidos de Fe e Al extraídas por NaOH (Gatiboni et al., 2013) e o uso de FN aumenta frações de P associadas ao Ca (Soltangheisi et al., 2018). Além disso, o efeito de cada fonte sobre frações de menor disponibilidade de P pode ser intensificado em solos deficientes em P, devido a necessidade de altas doses e da maior quantidade de sítios de adsorção disponíveis. Assim, é possível identificar o efeito de cada fertilizante monitorando as frações de P do solo.

O efeito do sistema SPD e das fontes de P sobre as reservas de P no solo e suprimento desse nutriente às plantas pode ser estudado utilizando fracionamentos químicos sequenciais. O fracionamento químico do P proposto por Hedley et al. (1982) consiste na extração sequencial de P inicialmente com a resina trocadora de ânions (RTA) seguida por extratores químicos que extraem formas inorgânicas ( $P_i$ ) e orgânicas ( $P_o$ ) de P cada vez mais estáveis, em ordem crescente de estabilidade no solo, ou decrescente sob o ponto de vista de disponibilidade às plantas. Em muitos estudos a interpretação do fracionamento de P se limita ao efeito das práticas ou sistemas de manejo sobre as frações de P no solo, e/ou estudos exploratórios de correlação de frações individuais de P no solo com o P disponível extraído com a RTA ou P-Mehlich (Gatiboni et al., 2007; Guardini et al., 2012; Schmitt et al., 2013; Teles et al., 2017). Entretanto, a simples correlação de uma fração de P no solo com o P disponível não necessariamente representa que essas variáveis tenham uma relação direta, ou até mesmo indireta. A relação de causalidade entre as formas de P no solo e o seu suprimento às plantas pode ser identificada pela análise de caminhos,



podendo-se através dessa análise identificar a contribuição direta de uma variável preditora sobre uma variável resposta dentro de um modelo proposto (Shipley, 2016). Além disso, pode-se determinar as contribuições indiretas das demais variáveis do modelo e também a direção de um caminho causal (Shipley, 2016). A análise de caminhos combinada com o fracionamento químico do P tem sido utilizada em alguns estudos avaliando a contribuição das diferentes frações orgânicas e inorgânicas de P para o P disponível (Ciampitti et al., 2011; Hashimoto et al. 2012; Gama-Rodrigues et al., 2014; Sales et al., 2015; Tiecher et al. 2018; Soltangheisi et al. 2019).

Utilizando a análise de caminhos, buscamos entender como ocorre o reabastecimento de frações reservas e disponíveis de P no solo a partir da aplicação de fosfato solúvel (SFT) e de fosfato de rocha (Bayóvar), e como essas frações disponibilizam P à cultura em Latossolos subtropicais com teor baixo e alto de P disponível in SPD.

## **2. Material e métodos**

### **2.1. Descrição do local de estudo e desenho experimental.**

Foram utilizados dois experimentos, ambos sob Latossolo Bruno Alumínico (Embrapa, 2016). Considerando o nível crítico de P no solo de 8,0 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich 1) (Fontoura et al., 2015), um experimento foi instalado em área com teor de P baixo (< 4,0 mg dm<sup>-3</sup>) no município de Campina do Simão, e o outro experimento foi instalado em área com P alto (8,0–16,0 mg dm<sup>-3</sup>) no município de Guarapuava, ambos na região Centro-Sul do Paraná (Tabela 17). Os experimentos consistiram de duas fontes de P e duas estratégias de adubação (Cultura e Sistema), segundo um delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial com tratamento adicional (2x2+1), e três repetições. O tratamento adicional foi o controle, sem adubação fosfatada.

Como fonte de P utilizou-se superfosfato triplo (SFT) e fosfato natural Bayóvar, que são fontes de alta e moderada solubilidade, respectivamente. A dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> foi baseada na resposta das culturas (Fontoura et al., 2015). As doses aplicadas foram de 115 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para a área com teor de P disponível

no solo considerado alto e de 350 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para a área com teor de P disponível no solo considerado baixo.

**Tabela 17. Caracterização química inicial da camada 0-20 cm das áreas experimentais sob Latossolo Bruno alumínico com teor inicial de P alto e baixo.**

Propriedade do solo	Alto P	Baixo P
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	503	600
Carbono orgânico total (g kg <sup>-1</sup> )	27,3	29,6
pH	5,4	5,4
P disponível por Mehlich-1 (mg dm <sup>-3</sup> )	11,2	3,3
K disponível por Mehlich-1 (mg dm <sup>-3</sup> )	0,3	0,2
Al trocável (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,2	0,1
Ca trocável (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	6,9	4,3
Mg trocável (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	2,4	4,0
Saturação por bases (%)	65	48
Saturação por Al (%)	2	4

A dose aplicada de cada tipo de fertilizante fosfatado é apresentada na Tabela 18. O modo de aplicação dos fertilizantes foi sempre na linha de semeadura. Na estratégia de adubação por cultura, a dose de P foi aplicada 50% na semeadura da cultura de inverno e 50% na semeadura da cultura de verão. Na estratégia de adubação de sistema, a dose foi adicionada integralmente na semeadura da cultura de inverno. Essa adubação foi realizada por três anos consecutivos previamente a realização da amostragem do solo e das plantas para este estudo.

Nos três anos foi cultivada a sucessão de culturas cevada/trigo/aveia no inverno e soja no verão em SPD. Ao final do terceiro ano de cultivo, amostras de solo foram coletadas em triplicata na camada de 0-10 cm e 10-20 cm de profundidade, as quais foram secas a 50°C, moídas, peneiradas a 2 mm e armazenadas.

**Tabela 18. Caracterização das fontes de fertilizante fosfatado e doses utilizadas**

Fonte	Sem P	SFT	Bayóvar
Classificação	–	Solúvel	Solubilidade moderada
Teor de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total (%)	–	46	29
Teor de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solúvel (%) *	–	45	14
Dose de fosfato experimento alto P (kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	0	256	821
Dose de fosfato experimento baixo P (kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	0	778	2500

\* Teor solúvel estimado com extração em citrato neutro de amônio + água para o superfosfato triplo, e em ácido cítrico para o Bayóvar.

## 2.2. P absorvido e produção total de grãos

O teor de P na biomassa da soja cultivada ao final do terceiro ano foi avaliado em ambos experimentos como índice de disponibilidade de P do solo. Para isso, amostras de planta foram coletadas no florescimento, secas a 60°C, moídas e submetidas a digestão nitro perclórica. Brevemente, 500 mg de amostra foi adicionada a tubos de digestão de 50ml, adicionou-se ácido nítrico (3ml), deixando em repouso por 12 horas, na sequencia as amostras foram levadas ao bloco digestor a 90° C pra finalizar a ação do ácido nítrico; após, a 120° C e adicionou-se o ácido perclórico (1ml) elevando a temperatura a 130° C; com os extratos claros, a temperatura foi aumentada para 180° C e mantida por 2 horas. Ao final, completou-se o volume (50ml) e determinou-se o teor de P do extrato pelo método de Murphy e Riley (1962).

A produção total de grãos foi determinada durante os três anos pela soma das produtividades das culturas em rotação: safras de inverno (trigo 2014, cevada 2015 e aveia 2016) e verão (soja 2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017), no ensaio em solo com teor inicial alto de P; safras de inverno (aveia cobertura 2015, trigo 2016 e cevada 2017) e verão (soja 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018) no ensaio com teor inicial baixo de P. Dessa forma, foram avaliadas apenas as safras com produção de grãos, sendo cinco cultivos para o ensaio com baixo P pois não houve produção/exportação na safra aveia 2015 e seis cultivos para o ensaio com teor inicial alto de P.

O balanço de P no solo foi calculado considerando o teor inicial e final de P disponível na camada 0-20 cm (média das duas camadas) utilizando a equação 4.

$$SB = FS - IS \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: SB= balaço do solo, FS= conteúdo final de P disponível no solo, IS= conteúdo inicial de P disponível no solo. O conteúdo final e inicial de P foi calculado considerando a densidade média dos solos em cada experimento.

O balanço efetivo de P foi calculado considerando o teor inicial e final de P disponível na camada 0-20cm, considerando todas as entradas de P (via fertilizante) e saídas de P (via grãos) considerando uma exportação de 4.4 kg de P t<sup>-1</sup> para as culturas de inverno e 6.1 kg de P t<sup>-1</sup> para a soja (Fontoura et al., 2015), utilizando a equação 5.

$$EB = (FS - IS) - (IF - OG) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: EB= balaço efetivo de P, FS= conteúdo final de P em 2017 (alto P) e 2018 (baixo P), IS= conteúdo inicial de P em 2014 (alto P) e 2015 (baixo P), IF= entradas de P via fertilizantes, OG= saída de P nos grãos.

### 2.3. Fracionamento químico sequencial de P no solo

As amostras de 0-10cm foram utilizadas na análise de fracionamento e posterior análise de caminhos. As formas de P do solo foram estimadas conforme metodologia descrita por Hedley et al. (1982), com modificações feitas por Rheinheimer (2000). Sequencialmente, as formas de P foram extraídas pelos seguintes extratores: P inorgânico extraído por resina de troca aniônica (RTA) (2,5 cm<sup>2</sup>) (placas AR 103 QDP 434); P inorgânico e orgânico extraído com NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> à pH 8,5; P inorgânico e orgânico extraído com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; P inorgânico extraído com HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>; P inorgânico e orgânico extraído com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>. Todos os extratores permaneceram em contato com a amostra durante 16 horas em agitador tipo 'sem fim' (33 rpm), com posterior centrifugação a 3500 rpm por 15 minutos. Nos extratos alcalinos de

NaHCO<sub>3</sub> e NaOH, o P total foi estimado por digestão com persulfato de amônio e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> em autoclave a 121°C, e posterior determinação do P conforme metodologia de Murphy e Riley (1962). O P inorgânico (Pi) dos extratos alcalinos (NaHCO<sub>3</sub> e NaOH) foi determinado pelo método de Dick e Tabatabai (1977) e o P inorgânico dos extratos ácidos (resina e HCl) foi determinado pelo método de Murphy e Riley (1962). O P orgânico (Po) foi então obtido pela diferença entre P total e o P inorgânico dos extratos alcalinos. O P extraído pela RTA e NaHCO<sub>3</sub> foi considerado lábil. O P extraído por NaOH (0,1 e 0,5) mol L<sup>-1</sup> e HCl mol 1 L<sup>-1</sup> moderadamente lábil. O P residual foi considerado não-lábil. O P residual e total foi estimado por digestão com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> na presença de MgCl<sub>2</sub> saturado (Olsen e Sommers, 1982).

#### 2.4. Análise estatística

O P da biomassa vegetal da soja (P<sub>Abs</sub>) foi utilizado como índice de disponibilidade de P para as plantas, em substituição ao P extraído por RTA. Para avaliar o efeito das fontes de P, as estratégias de adubação (cultura e sistema) foram avaliadas de forma conjunta, e o P residual, por não ser extraído por nenhum dos extratores utilizados e não contribuir significativamente com as demais formas de P (Tiecher et al., 2018), não foi utilizado no modelo. Além disso, para avaliar a contribuição das frações de P numa situação sem adubação o tratamento controle de ambos os experimentos foram avaliados juntos.

Para determinar a contribuição das frações de P obtidas no fracionamento no suprimento de P às plantas utilizou-se a análise de caminhos com modelos de testes causais (Tiecher et al., 2018). Brevemente, nessa metodologia utiliza-se a abordagem de D'separação, em que um conjunto de relações independentes entre as variáveis incluídas no modelo foram definidas para cada modelo causal proposto, ligando as frações de P ao P<sub>Abs</sub> e suas combinações entre si. Cada um desses relacionamentos independentes envolveu correlações e correlações parciais que foram testadas por permutação (Manly, 2007).

Cada modelo causal gerou um valor de probabilidade para uma estatística composta (C da estatística de Fisher; Shipley 2000), que foi testado usando a distribuição de probabilidade do  $\chi^2$ . Para que o modelo causal seja válido deve ter valor *p* maior que um limite de probabilidade aceitável (*p* > 0,05). Para cada

modelo válido, modelos de regressão foram utilizados para determinar os coeficientes de caminho e probabilidades correspondentes, encontrados por permutação (Manly, 2007), além de um coeficiente de não-determinação (U). As variáveis (respostas e fatores) foram centralizadas e padronizadas para a unidade de variância e, portanto, os coeficientes de caminho ( $\beta$ ) foram comparados entre os modelos.

Os resultados de produção, balanço de P e frações de P foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e quando significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Socott-Knott a 5% de probabilidade.

### **3. Resultados e discussão**

#### **3.1. Produção de grãos e balanço de P**

A produção acumulada de grãos e, conseqüentemente, a quantidade de P exportada, foi maior no solo com teor inicial de P alto em relação ao solo com teor inicial baixo de P (Tabela 19). Com adubação, em média para ambos os fosfatos, foram produzidos 15 t de grãos no solo com baixo P (soma de cinco safras) e 32 t no solo com alto P inicial (soma de 6 safras). No solo com teor inicial baixo de P a dose acumulada de 1050 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aumentou a produção total de grãos em 375% em média para ambos os fosfatos. Porém, para cada quilo de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado foram produzidos em média 14 kg de grãos, retorno muito menor do que o apresentado em solo com teor inicial alto, em que, para cada kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado foi produzido 93 kg de grãos. Os resultados indicam que no solo deficiente em P as reservas de P do solo, acessadas pelas plantas (Pavinato et al., 2009; Gatiboni et al., 2007; Soltangheisi et al., 2019), mostraram-se insuficientes para alcançar altas produtividades, dessa forma, as culturas foram muito dependentes do P aplicado via fertilizante. Por outro lado, em solo com alto P, as reservas de P do solo foram suficientes para manter altas produtividades, pois, mesmo sem adubação durante seis safras, a produção total de grãos foi apenas 6% menor em relação aos tratamentos com adubação (Tabela 19). Além disso, o balanço efetivo de P demonstra ser muito mais negativo quando da adubação em solo com baixo P, indicando que a maior parte do P aplicado não é aproveitado pelas culturas, já em solos já corrigidos (alto P),

o balanço efetivo é próximo a zero quando da adubação, o que sugere que a dose recomendada, de manutenção e produção, foi adequada.

Diversos trabalhos tem sugerido que em SPD o aumento das reservas de P, principalmente nas frações de  $P_o$ , pode significar uma potencial fonte de P para as culturas (Tokura et al., 2002, Bassamba et al., 2006, Bravo et al., 2006, Zamuner et al., 2008, Gatiboni et al., 2008). Nesse sentido, verificamos que as reservas em solo corrigido em SPD de longa duração mantiveram altas produtividades por um período de três anos, indicando que o legado de P no solo com maior histórico de fertilização fosfatada deve ser considerado para definição da dose a ser aplicada ou não, em cultivos futuros (Withers et al., 2018). Além disso, a capacidade do legado do P manter altas produtividades pode ser muito maior. Liu et al. (2017) estimaram que o legado do P poderia suportar a produção agrícola acima de 90% da capacidade do solo adubado por até 20 anos, em Mollisols da China.

O balanço efetivo de P foi mais negativo, em média, para ambos os fosfatos, no solo com teor inicial baixo de P (Tabela 19), indicando que efeito da adubação sobre as reservas de P no solo é maior em solo com teor inicial baixo de P em relação ao solo já corrigido. Dessa forma, mais P foi transferido às frações não disponíveis, o que se deve principalmente a alta dose aplicada nesse solo e a maior quantidade sítios de adsorção de fosfatos disponíveis, devido a situação de deficiência. Porém, o uso do Bayóvar minimizou o efeito da adsorção do fosfato em solo com baixo P, aumentando a disponibilidade final de P, com balanço positivo de  $85 \text{ kg ha}^{-1}$ , maior que o SFT ( $35 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e, considerando o P exportado pelas culturas (balanço efetivo), menos P foi transferido para frações não disponíveis quando utilizado o Bayóvar comparado ao SFT. Dessa forma, mais P permaneceu em frações inorgânicas disponíveis após três anos de experimento, o que se deve a liberação gradual do Bayóvar, que pode representar uma menor sorção do fosfato com alto grau de energia em relação ao SFT (Rodrigues et al., 2016). Porém, durante a correção da disponibilidade de P (baixo P) a dissolução gradual do fosfato natural não disponibilizou P de forma satisfatória para as culturas, uma vez que, o Bayóvar produziu duas toneladas a menos de grãos ao longo dos três anos, sendo esse efeito maior nos cereais de inverno (Tabela 19).

**Tabela 19. Balanço do P disponível (RTA) para a camada de 0-20 cm, produção acumulada de grãos e P exportado nos grãos após três anos em dois Latossolos com teor inicial de P baixo e alto, com e sem aplicação de SFT e Bayóvar.**

Experimento/ tratamento	Produção acumulada de grãos (Mg ha <sup>-1</sup> )			Teor inicial (2014) <sup>a</sup>	Acumulado de 2014 a 2017		Teor final (2017)	Balanço no solo <sup>c</sup>	Balanço efetivo <sup>d</sup>
	Inverno	Verão	Total		Entrada de P (kg ha <sup>-1</sup> )	Saída de P (kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>			
Baixo P									
Controle	1,1 c	2,5 b	3,6 b	36	0	20	10 c	-26 c	-6 a
SFT	4,4 a	11,6 a	16,0 a	36	458,2	89	70 b	35 b	-334 c
Bayóvar	2,9 b	11,0 a	13,9 a	36	458,2	80	120 a	85 a	-293 b
Alto P									
Controle	14,9	15,3	30,2	120	0	159	76	-44	115 a
SFT	16,5	15,6	32,1	120	150,6	167	102	-18	-1 b
Bayóvar	16,1	15,8	31,9	120	150,6	167	100	-22	-5 b

Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ( $p < 0,05$ ).

Considerando uma exportação de 4.4 kg de P t<sup>-1</sup> de grãos das culturas de inverno (aveia, trigo e cevada) e 6.1 kg de P t<sup>-1</sup> de grão de soja (Fontoura et al., 2015).

<sup>c</sup> SB = FS - IS (SB = Balanço do solo).

<sup>d</sup> EB = (FS - IS) - (IF - OGM) (EB = Balanço efetivo; FS = Conteúdo final no solo; IF = Entradas via fertilizante; IS = Conteúdo inicial no solo; OGM = Saída via grãos).

### 3.2. Frações de P no solo

A fonte de P solúvel (SFT) aumentou as frações lábeis inorgânicas (P<sub>i bic</sub>) e moderadamente lábeis (P<sub>NaOH0,1</sub>) em ambos os solos (Tabela 4), resultando em um uso mais eficiente de P pelas culturas. Por outro lado, o aumento do P<sub>i HCl</sub>, que extrai compostos de P-Ca, foi mais acentuado com o Bayóvar do que com o SFT, principalmente no solo com baixo P, onde foram utilizadas doses mais altas de fosfato. O Bayóvar é composto principalmente por apatitas (minerais P-Ca) que, devido à sua baixa solubilidade, tendem a se acumular no solo.

Assim como observado nos estudos II e III o P orgânico de baixa labilidade (P<sub>NaOH0,5</sub>) foi superestimado quando o Bayóvar foi aplicado (Tabela 4), conforme relatado por Tiecher et al. (2021).



**Tabela 20. Frações de P em dois Latossolos com teor inicial baixo e alto de P disponível, com e sem fertilização com SFT e Bayóvar.**

Local/ Tratamentos	P absorvido (kg ha <sup>-1</sup> )	Frações inorgânicas de P no solo (mg kg <sup>-1</sup> )					Frações orgânicas de P no solo (mg kg <sup>-1</sup> )					Residual P	Total P
		RTA	NaHCO <sub>3</sub> 0,5 mol L <sup>-1</sup>	NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup>	HCl 1,0 mol L <sup>-1</sup>	NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup>	NaHCO <sub>3</sub> 0,5 mol L <sup>-1</sup>	NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup>	NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup>	Total Pi	Total Po		
<b>Baixo P</b>													
Controle	1 b	3 b	4 b	17	2 b	24	18	255 b	159 b	432 b	825	1307 b	
SFT	10 a	51 a	31 a	39	4 b	19	20	539 a	208 b	767 a	883	1796 ab	
Bayóvar	6 a	42 a	7 b	28	147 a	28	26	359 b	531 a	916 a	1115	2283 a	
<b>Alto P</b>													
Controle	7	14	13	46	4 b	57 b	19	557 b	238 b	814	2280	3231	
SFT	8	29	20	62	7 b	68 ab	19	724 a	303 a	1046	2444	3676	
Bayóvar	8	28	21	60	30 a	81 a	20	614 a	415 a	1049	2384	3653	

Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott para p < 0,05.

RTA, resina trocadora de ânions.

Pi, P inorgânico.

Po, P orgânico.

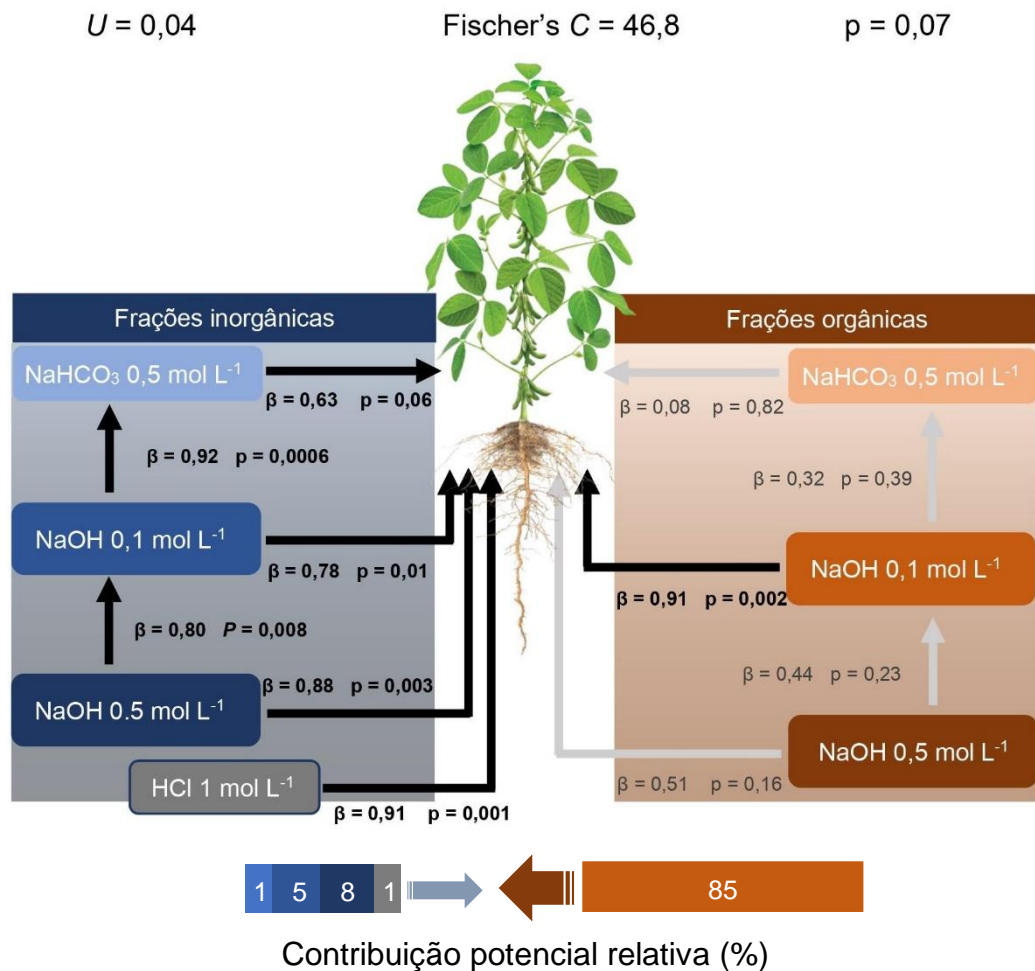
Também é importante notar que, mesmo após três anos recebendo taxas três vezes mais altas de P, o teor total de P no solo fertilizado com baixo teor de fósforo é aproximadamente metade do observado no solo com alto teor de fósforo (Tabela 4). Além disso, a proporção de P residual no solo fertilizado com alto teor de fósforo (67%) é consideravelmente superior à observada no solo com baixo teor de fósforo (49%), demonstrando que, para atingir um nível de disponibilidade de fósforo adequado para as culturas, é necessário adicionar uma grande quantidade de P, que é adsorvido com alta energia no solo não disponível para as plantas.

### 3.3. Contribuição das formas de P para a soja avaliada pela análise de caminhos sem aplicação de P – uso do legado de P do solo

Em solos não adubados as plantas desenvolvem vários mecanismos para disponibilizar e absorver o P do solo. Os resultados dessas estratégias podem ser visualizados na Figura 16. Nesse cenário a maioria das frações avaliadas contribuem diretamente para o P disponível/absorvido pelas plantas ( $P_{Abs}$ ). A análise de caminhos indica que o  $P_{Abs}$  foi diretamente abastecido ( $p > 0,1$ ) por todas as frações inorgânicas avaliadas. Os resultados demonstram que as plantas absorveram o P disponibilizado de frações de alta e moderada labilidade ( $P_{ibic}$  e  $P_{iNaOH0.1}$ ) e também de frações consideradas de baixa labilidade e/ou não lábeis ( $P_{iNaOH0.5}$  e  $P_{iHCl}$ ) consideradas reservas de P (Figura 16).

Possivelmente, a não aplicação de adubação fosfatada intensificou a dissolução de Pi de menor labilidade ligado aos óxidos e ao Ca (Hedley et al., 1982; Condrón et al., 1985; Linnquist et al., 1997; Liu et al., 2017). Isso pode ser resultado do aumento de ácidos orgânicos no solo em SPD, os quais podem deslocar o fosfato ligado aos óxidos e/ou dissolver fosfatos de Ca pela acidificação do ambiente rizosférico (Fink et al., 2016). Com a depleção do P de frações disponíveis (P resina e  $P_{bic}$ ), frações de menor labilidade ( $P_{iNaOH0.1}$ ,  $P_{iNaOH0.5}$  e  $P_{oNaOH0.1}$ ) atuam no tamponamento de formas inorgânicas de P de maior labilidade disponíveis e/ou mantêm o suprimento de P para as plantas (Pavinato et al., 2009; Gatiboni et al., 2007). Nesse sentido, frações de baixa labilidade (Legado do P) contribuíram de forma direta e indireta com parte do P

absorvido pelas plantas na ausência de adubação. Dessa forma, as reservas de P foram acessadas pelas plantas mantendo altas produtividades em solo com teor alto de P (Tabela 3). Resultados semelhantes foram apresentados por Tiecher et al. (2018), em que parte do P disponível foi tamponado por frações inorgânicas de média e baixa labilidade em SPD.



**Figura 16.** Relações entre frações inorgânicas e orgânicas de P e suas contribuições para o P absorvido em Latossolos sob SPD **sem** aplicação de P após três anos de cultivo. [Setas pretas indicam caminhos significativos ( $p < 0,1$ )]

Sem adubação houve contribuição direta de todas as frações minerais de P para o P absorvido pelas plantas, no entanto, devido ao menor tamanho do compartimento  $P_i$  em relação ao  $P_o$ , proporcionalmente essa contribuição foi de apenas 15%. O que pode ser observado ao avaliarmos a análise de caminhos

(Figura 16), em que, a fração  $P_{oNaOH0.1}$  também contribui diretamente ( $p < 0,1$ ) no fornecimento de P às plantas, de modo que corresponde a 85% do P potencialmente disponível nesse cenário, mesmo sendo apenas uma fração. Dessa forma, na ausência de fertilização o  $P_o$  representa o maior potencial de fornecimento de P às plantas em SPD.

Em ambiente natural ou agrícola a ciclagem do  $P_o$  torna-se uma importante fonte de P em solos tropicais (Condrón e Tiessen, 2005; Cherubin et al., 2016), principalmente em situação de deficiência de P (Chimdi et al., 2014) ou pela ausência de adubação. Além disso, a deficiência de P e/ou a suspensão da adubação pode desencadear a mineralização do  $P_o$  não disponível por microrganismos, quando as concentrações de C e N são suficientes para a proliferação microbiana (Richardson e Simpson, 2011; Mander et al., 2012). Resultados semelhantes foram relatados Soltangheisi et al. (2019) em que a contribuição do  $P_o$  para o P disponível foi de 83% em média para Latossolos argilosos de florestas e pastagens sem adubação, inclusive de frações consideradas reservas de  $P_o$  ( $P_{oNaOH0.5}$ ).

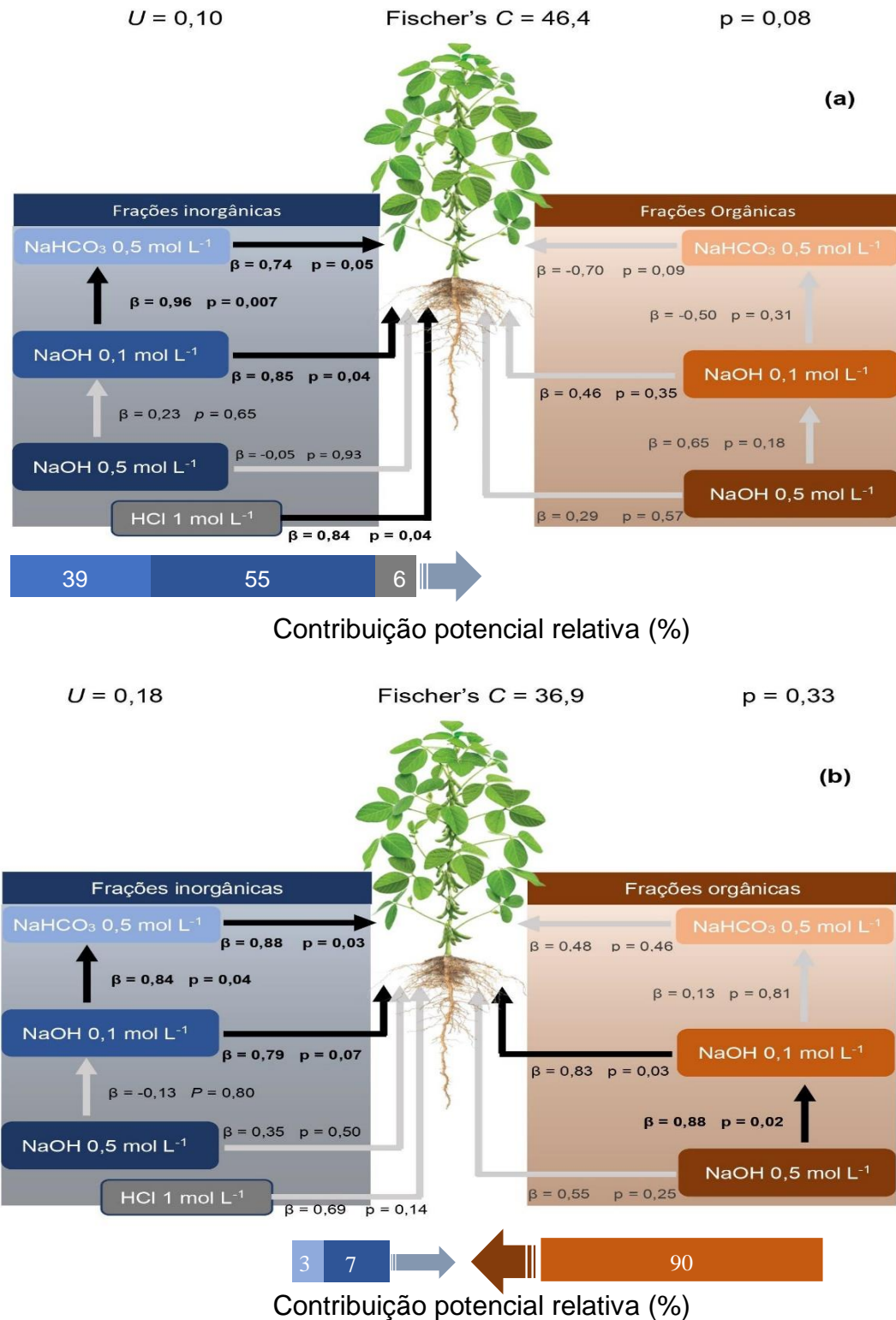
#### 3.4. Contribuição das formas de P para a soja avaliada pela análise de caminhos com aplicação de superfosfato triplo

A adubação fosfatada alterou o caminho de suprimento de P às plantas (Figuras 17 e 18). Com a utilização de uma fonte de P solúvel (SFT), a contribuição imediata das frações orgânicas de P foi interrompida no solo com P baixo (Figura 17a) e foi bastante expressiva no solo com teor de P alto (90%) (Figura 17b). Por sua vez, o potencial de contribuição imediata do  $P_i$  no suprimento de P à cultura foi inversa, 10% com teor inicial de P alto e 100% com teor inicial de P baixo no solo. Porém, vale ressaltar que embora em alguns casos o modelo aponte 100% de absorção de formas inorgânicas, por exemplo, isso significa que temos uma contribuição principal de  $P_i$ , mas que certamente deve ocorrer contribuição de formas de  $P_o$ . A contribuição potencial relativa é apenas um artefato matemático para ressaltar/enfatizar as formas que tem maior probabilidade de abastecer a planta

Com teor de P baixo no solo, o SFT aumentou a contribuição de frações mais lábeis de  $P_i$  e reduziu a contribuição de frações de labilidade moderada ou

baixa. Dessa forma, o uso do SFT forneceu P à cultura diminuindo a pressão do sistema sobre frações consideradas reservas de P no solo. Por sua vez, em solo com teor alto de P, o uso do SFT manteve o suprimento de P pela fração de P orgânico moderadamente lábil, e restringiu a contribuição das frações inorgânicas  $P_{iNaOH0.5}$  no suprimento de P à cultura (Figura 17b). Nesse cenário, em SPD consolidado, a adubação fosfatada com SFT pode favorecer o aumento da atividade biológica, a ciclagem do P da biomassa microbiana e a mineralização do P orgânico, contribuindo para o suprimento de P às plantas (Conte et al., 2003; Gatiboni et al., 2007). A fração  $P_{oNaOH0.1}$  é composta por Po moderadamente lábil associada aos ácidos fúlvicos e húmicos adsorvidos, principalmente monoésteres de ortofosfato (Hedley et al., 1982; Condrón et al., 1985; Linnquist et al., 1997; Liu et al., 2017); no entanto, compostos facilmente mineralizáveis como diésteres de P e ácidos teicóicos também são encontrados nessa fração (Guggenberger et al., 1996; Liu et al., 2017), o que pode explicar, em parte, a contribuição do  $P_{oNaOH0.1}$  para o  $P_{Abs}$  em SPD consolidado.

A análise de caminhos indicou que a adubação com a fonte solúvel de P (SFT) aumentou a intensidade dos fluxos de fornecimento das frações inorgânicas mais lábeis  $P_{ibic}$  e  $P_{iNaOH0.1}$  para o  $P_{Abs}$ , em relação ao solo não fertilizado [ $P_{ibic}$  ( $\beta = 0,63$ )  $\rightarrow P_{Abs}$  em solo não fertilizado para  $P_{ibic}$  ( $\beta = 0,74$ )  $\rightarrow P_{RTA}$  quando adubado com SFT] e [ $P_{iNaOH0.1}$  ( $\beta = 0,78$ )  $\rightarrow P_{Abs}$  em solo não fertilizado para  $P_{iNaOH0.1}$  ( $\beta = 0,85$ )  $\rightarrow P_{Abs}$  quando adubado com SFT] abaixo do NC (Figura 17a). Dessa forma, em solo deficiente em P a capacidade das frações inorgânicas de maior labilidade ( $P_{ibic}$  e  $P_{iNaOH0.1}$ ) disponibilizar P as plantas aumentou quando da adubação com SFT. A liberação imediata do P do SFT favorece a rápida adsorção do fosfato na superfície dos óxidos de Fe e Al com alto grau de energia (Pearse et al., 2007; Rodrigues et al., 2016). Com a saturação dos sítios de sorção com fosfato ( $PO_4^-$ ), ocorre o bloqueio das vias de imobilização, tornando a superfície mais negativa (Barrow e Debnath, 2014), e o P se acumula mais rapidamente em formas mais lábeis de P (Tabela 5). Com os sítios de sorção ocupados, mais P adicionado como fertilizante é convertido a frações mais disponíveis, e a longo prazo aumenta-se a eficiência da adubação fosfatada (Rodrigues et al., 2016; Herrera et al., 2016).



**Figure 17.** Relações entre frações inorgânicas e orgânicas de P em um Latossolo sob SPD, com aplicação anual de P na forma de SFT e suas contribuições para o P absorvido pelas plantas com teor inicial baixo (a) e alto (b) de P disponível. [Setas pretas indicam caminhos significativos ( $p < 0,1$ )]

### 3.5. Contribuição das formas de P para a soja avaliada pela análise de caminhos com aplicação de fosfato natural

O uso de fosfato natural também modificou o suprimento de P do solo às plantas (Figuras 18). A adição do Bayóvar em solo com nível baixo de P (Figura 18a) as plantas absorveram o P de quatro vias preferenciais ( $P_{\text{ibic}}$ ,  $P_{\text{iNaOH0.5}}$ ,  $P_{\text{iHCl}}$  e  $P_{\text{oNaOH0.1}}$ ) semelhante aos solos sem adubação, o que possivelmente seja decorrente da liberação lenta de P do fosfato natural. Porém, assim como ocorrido com o uso do SFT, a adição de P ao sistema, em situação de deficiência de P minimizou a contribuição do  $P_{\text{o}}$ . A contribuição relativa da fração  $P_{\text{oNaOH0.1}}$  passou de 85% em solos não adubados para 66% com a aplicação do Bayóvar em solo com baixo P após três anos. Esse resultado se deve principalmente ao aumento da contribuição da fração  $P_{\text{iHCl}}$  que está associada aos fosfatos de Ca, como as apatitas presentes nos fosfatos naturais. Esse efeito pode ser ainda maior com o uso do Bayóvar, pois as apatitas presentes nesse fertilizante são de baixa cristalinidade, o que facilita sua dissolução (Faria e Guardieiro, 2011; Barreto et al., 2018).

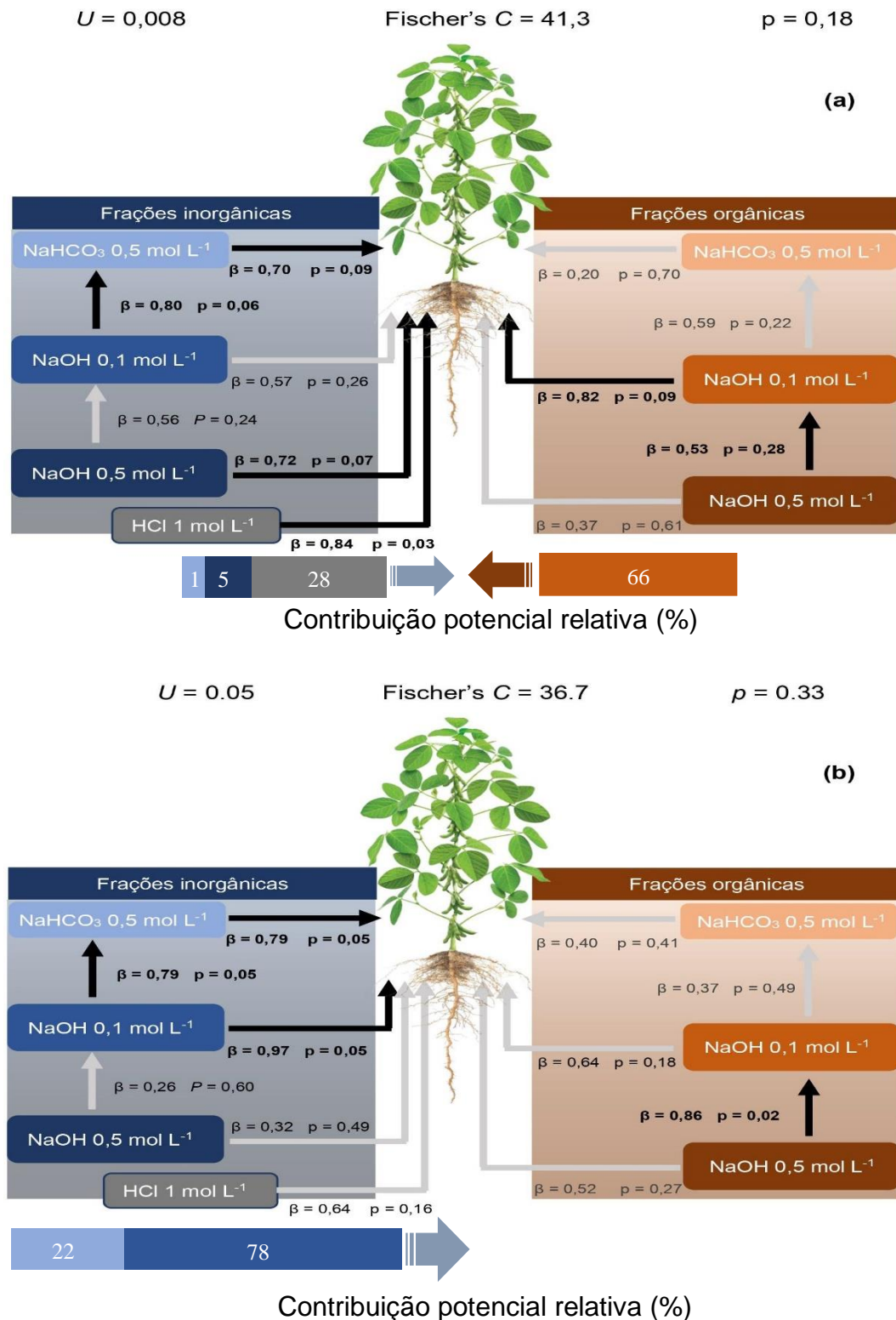
O Bayóvar também abasteceu de forma eficiente o  $P_{\text{Abs}}$  e as reserva de P quando aplicado em solo com teor alto de P (Figura 18b). Nesse cenário todo o P foi absorvido de frações inorgânicas de P de alta e média labilidade ( $P_{\text{ibic}}$  e  $P_{\text{iNaOH0.1}}$ ), indicando que o uso dessa fonte em ambiente já corrigido favorece a liberação gradual do P de frações inorgânicas mais lábeis, preservando o  $P_{\text{o}}$  e  $P_{\text{i}}$  de frações de baixa labilidade, consideradas estoques de P no solo. Resultados semelhantes foram relatados por Zhang e MacKenzie (1997); Zheng et al. (2002) e Ciampitti et al. (2011), os quais associaram a maior quantidade de  $P_{\text{i}}$  aplicado, em relação ao absorvido pelas plantas (balanço positivo de P), como redutor da atividade das fosforilases ácidas e, conseqüentemente, da mineralização da fração  $P_{\text{oNaOH0.1}}$ , preservando o  $P_{\text{o}}$ . Da mesma forma, Hedley et al. (1982) observaram aumentos em frações orgânicas de P em solos adubados.

A solução HCl 1 mol L<sup>-1</sup> extrai parte do P ligado a apatita, além de outros compostos P-Ca pouco solúveis (Hedley, et al., 1982). O uso do SFT em solo com teor baixo de P aumentou a contribuição da fração  $P_{\text{iHCl}}$  de 1% quando sem adubação para 6% após três anos de adubação (Figura 16 e 17a). O mesmo

ocorreu com o uso do Bayóvar, porém com maior efeito, em que a contribuição chegou a 28% (Figura 18a). Geralmente essa fração aumenta quando fosfatos naturais são aplicados ao solo (Soltangheisi et al., 2018), e em SPD, pode ocorrer a neoformação de P-Ca, principalmente nos primeiros centímetros do perfil do solo devido a calagem superficial (Rheinheimer e Anghinoni, 2001; Gatiboni et al., 2007), mas pouco se sabe sobre a contribuição dessa fração para a nutrição das plantas, sendo considerada uma fração não lábil e/ou reserva de P a médio e longo prazo. Contudo, no presente estudo, segundo a análise de caminhos, os fosfatos de Ca, adicionados como fosfato natural e/ou precipitado quando do uso de SFT associado a calagem, contribuíram de forma direta para o suprimento de P as plantas em SPD. Resultados semelhantes foram relatados por Liu et al. (2017), em que as reservas de P ligado ao Ca, após 27 anos, diminuíram 55% em Mollisols sem adubação fosfatada e aumentaram em 323 % quando P foi adicionado. Dessa forma, os fosfatos de Ca podem ser um importante reserva de P construída ao longo dos cultivos, podendo ser aproveitada pelas culturas com a suspensão da adubação.

De modo geral, os resultados obtidos no presente estudo permitem inferir que a adubação fosfatada alterou a forma como o solo disponibiliza P das frações minerais e influenciou diretamente nos mecanismos de proteção do Po e/ou da MOS em SPD. Tanto o SFT quanto o fosfato natural aumentaram a contribuição de frações de Pi de maior labilidade e diminuíram a contribuição de frações de Po. Dessa forma, a fertilização do solo, independentemente da fonte, diminui a pressão sobre as reservas de P orgânico do solo. Resultados semelhantes foram relatados por Beck e Sanchez (1994) e Ciampitti et al. (2011), em que a maior parte do P disponível foi tamponada pela fração  $P_{oNaOH0.1}$ , em solo não adubado. Além disso, em ambos os solos desse estudo, com a suspensão da adubação o legado de P, ou seja as reservas de P natural ou acumulada por adubações anuais, foram acessada pelas plantas, demonstrando ser uma importante fonte de P no solo, podendo suprir a maior parte da demanda de P em SPD, diminuindo a necessidade de altas doses de fertilizantes a partir da correção da disponibilidade de P no solo (Rowe et al., 2016; Withers et al., 2018; Soltangheisi et al., 2019).





**Figura 18.** Relações entre frações inorgânicas e orgânicas de P em um Latossolo sob SPD, com aplicação anual de P na forma de Bayóvar e suas contribuições para o P absorvido pelas plantas com teor inicial baixo (a) e alto (b) de P disponível. [Setas pretas indicam caminhos significativos ( $p < 0,1$ )]

#### 4. Conclusões

Em ambos os solos, para as duas fontes, o P adicionado acumulou em frações orgânicas e inorgânicas de moderada e baixa labilidade. Em solo com teor inicial baixo de P o balanço efetivo de P é mais negativo, indicando um menor aproveitamento do P aplicado via fertilizante. Já em solo com alto P, altas produtividades foram alcançadas, mesmo com a suspensão da adubação por três anos, o que demonstra a importância do legado do P construído ao longo dos anos em SPD.

O modelo proposto foi eficiente em explicar as variações do P absorvido pelas plantas a partir das modificações nas frações disponíveis e reservas de P extraíveis dos solos avaliados, quando do uso de fontes de P de alta e moderada solubilidade.

Em solos sem adubação houve contribuição de todas as frações inorgânicas para o  $P_{Abs}$ , inclusive frações consideradas não lábeis ( $P_{iNaOH0.5}$ ), porém a maior parte (85%) do  $P_{Abs}$  foi suprido pela fração de Po moderadamente lábil ( $P_{oNaOH0.1}$ ), indicando que nesse cenário as reservas orgânicas e inorgânicas de P estão sendo utilizadas pelas culturas.

Em solo com teor de P abaixo do nível crítico, a adubação promoveu aumento da contribuição de frações inorgânicas de maior labilidade ao suprimento de P às plantas, diminuindo a contribuição de frações orgânicas de P. Sem adubação o Po forneceu 85% do suprimento total de P às plantas, com o Bayóvar a contribuição das frações orgânicas diminuiu para 66% e com o uso do SFT, o suprimento de P por frações orgânicas foi interrompida, minimizando a contribuição do legado de P.

Em solo com teor alto de P, os caminhos de absorção do P são semelhantes para as duas fontes, e não existe liberação direta de frações orgânicas e inorgânicas de baixa labilidade, o que contribui para o aumento das reservas de P no solo e/ou do legado de P, principalmente Po, para cultivos futuros. Dessa forma, preservar frações não lábeis de Po pode diminuir a dependência de altas doses de fertilizantes fosfatados no futuro, minimizando os custos e o risco ambiental da adubação fosfata em SPD.

## **CAPÍTULO 7 - Considerações Finais**

Nas últimas décadas a Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), por meio de pesquisas direcionadas a região Centro-Sul paranaense, desenvolveram tecnologias que permitiram aos produtores aperfeiçoarem seus sistemas produtivos, aumentando a produtividade de suas lavouras. Da mesma forma, o presente estudo preenche algumas lacunas importantes para o manejo da adubação fosfatada durante a correção da disponibilidade de P e também em sistemas com fertilidade construída, o que contribuirá para o melhor aproveitamento dos fosfatos aplicados ao solo em qualquer situação.

Durante a correção da disponibilidade de P, durante três anos, os fosfatos solúveis corrigiram a disponibilidade de P e mantiveram altas produtividades das culturas em rotação. Dessa forma, o uso de fontes solúveis proporcionou os maiores retornos econômicos, principalmente em solos com teor inicial baixo de P. Porém, vale ressaltar que o maior retorno produtivo e econômico está condicionado ao uso da estratégia de adubação cultura, pois em situação de deficiência as plantas dependem muito do P aplicado via fertilizante e dividir a adubação para cada cultura melhorou o aproveitamento do P aplicado.

A eficiência dos fosfatos solúveis se deve a forma como abastecem as frações de P do solo. Fontes solúveis de modo geral abastecem frações orgânicas e inorgânicas de maior labilidade, corrigindo e mantendo a disponibilidade num menor tempo em relação as fontes de solubilidade moderada. Além de abastecer as frações mais disponíveis de P, a adubação com fosfatos solúveis intensificou a capacidade de fornecimento de P dessas frações para as plantas, diminuindo o fornecimento de frações orgânicas reservas de P, quando o solo não é adubado, o que pode contribuir para manutenção do estoque de P<sub>o</sub> para cultivos futuros.

Dentre as fontes de moderada solubilidade utilizadas nesse estudo o Bayóvar se mostrou mais promissor, podendo ser utilizado em algumas

situações durante a correção da disponibilidade e também como alternativa as fontes solúveis em solos acima do nível crítico. O Bayóvar, também corrigiu a deficiência de P ao final dos três anos, em ambos os solos abaixo no nível crítico (Baixo e Médio P), porém a eficiência durante os dois primeiros anos é menor, apresentando menor retorno produtivo e econômico. Isso se deve a solubilidade gradual, mas também a forma como o fosfato natural abastece as frações de P no solo. O Bayóvar aumentou principalmente frações de P associadas ao Ca (P-Ca), consideradas pouco disponíveis, o que pode explicar em parte a menor eficiência durante a correção da disponibilidade. Porém, após o terceiro ano a produtividade das culturas não diferiu dos tratamentos com fosfatos solúveis.

De modo geral, em solos deficientes em P o manejo da adubação fosfatada deve ser feito utilizando fontes solúveis de P associadas a estratégia de adubação de cultura. Fontes de menor solubilidade como os termofosfatos e fosfatos naturais podem ser uma alternativa em solos com fertilidade construída em SPD, uma vez que mantiveram o teor de P na classe alta e não comprometeram a produtividade das culturas em rotação. Além disso, a partir da correção a estratégia de adubação diminui o efeito dentro do manejo, podendo ser utilizada qualquer uma das estratégias aqui estudadas (sistema e cultura) sem perda de rendimento e/ou eficiência da adubação.

## Referências Bibliográficas

ALMEIDA, J.A., TORRENT, J., BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 985–1002, 2003.

ALTMANN, N. **Adubação de sistemas integrados de produção em plantio direto: Resultados práticos do cerrado**. Piracicaba: Instituto Internacional de nutrição de plantas - Brasil, Informações agronômicas, 2012. 8 p.

ANGHINONI, I. **A method for predicting the most efficient phosphate placement for corn using a simulation model**. 1979. 170 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Agronomy Department, Universidade Purdue, West Lafayette, 1979. <https://search.proquest.com/docview/302962390>

ANGHINONI, I.; MEURER, E. J. Suprimento de nutrientes pelo solo e sua absorção pelas plantas. *In*: BISSANI, C. A. *et al.* (ed.) **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Genesis, 2004. p. 33-43.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995. 414 p.

BARRACLOUGH, P. B.; TINKER, P. B. The determination of ionic diffusion coefficients in field soils. I. Diffusion coefficients in sieved soils in relation to water content and bulk density. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 32, n. 2, p. 225-236, 1981.

BARRETO, M. S. C. *et al.* Agronomic efficiency of phosphate fertilizers produced by the re-use of a metallurgical acid residue. **Journal of Environmental Management**, London, v. 208, p.1-7, 2018.

BARROW, N. J., DEBNATH, A. Effect of phosphate status on the sorption and desorption properties of some soils of northern India. **Plant and Soil**, Haia, v.378, p. 383–395, 2014.

BASSAMBA, T. A. *et al.* Tillage effects on maize yield in a Colombian savana Oxisol: Soil organic matter and P fractions. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, p. 131-142, 2006.

BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 34, p. 1424–1431, 1994.

BORTOLON, L. *et al.* **Obtenção de altas produtividades em sistemas agrícolas. Fronteira Agrícola**, Palmas: Embrapa pesca e aquicultura, 2016. 3 p. (Informativo Técnico)

BRAVO, C. *et al.* Long-term effect of tillage on phosphorus forms and sorption in a Vertisol of Southern Spain. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 25, p. 264-269, 2006.

CAIRES, E. F. *et al.* Phosphate fertilization strategies for soybean production after conversion of a degraded pastureland to a no-till cropping system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 308, p. 120-129, 2017.

CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; PAVINATO, A. Manejo da adubação. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.) **Fertilidade do Solo**. Viçosa, SBCS, 2007. p. 851-872.

CHERUBIN, M. R. *et al.* Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 267, p. 156-168, 2016.

CHIMDI, A.; ESALA, M.; YLIVAINIO, K. Sequential fractionation patterns of soil phosphorus collected from different land use systems of Dire Inchine District, West Shawa Zone, Ethiopia. **American-Eurasian Journal Science Research**, Cairo, v. 9, n. 3, p. 51-57, 2014.

CIAMPITTI, I. A. *et al.* Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, p. 131–142, 2011.

CIOTTA, M. N. *et al.* Acidificação de latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1055-1064, 2002.

CONDRON, L. M.; TIESSEN, H. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. *In*: TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. (ed.). **Organic Phosphorus in the Environment**. Wallingford: CABI Publishing, 2005. p. 295-307

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance analysis. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 36, p. 199-207, 1985.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER D. S. Frações de fósforo acumuladas em latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 893-900, 2003.

COREY, R. B.; SCHULTE, E. E. Factors affecting the availability of nutrients to plants. *In*: WALSH, L. M.; BEATON, J. D. (ed.) **Soil testing and plant analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1973. p. 23-33

CORRÊA, J. C. *et al.* Phosphorus in soil and soybean growth as affected by phosphate fertilization and cover crop residues. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 9, p. 1231-1237, 2004. DOI: 10.1590/S0100-204X2004001200010

CQFS-COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: SBCS-NRS, 2016. 376 p.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 6, p. 82-85, 1977.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA (ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2016.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology**, Davis, v. 50, p. 641-664, 1999.

FARIA, F. M.; GUARDIEIRO, G. A. Adubação fosfatada na cultura da soja. **Revista Passarela da Soja**, Luiz Eduardo Magalhães, BA, v. 1, p. 105-111, 2011.

FINK, J. R. *et al.* Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, p. 369–379, 2016. DOI:10.1590/1413-70542016404023016.

FONTOURA, S. M. V. *et al.* **Fósforo no solo pelo método da resina**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2016. 5 p. (Folder)

FONTOURA, S. M. V. *et al.* **Fertilidade do solo e seu manejo em plantio direto no Centro-Sul do Paraná**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2015. 146 p.

FRANZINI, V. I. *et al.* Eficiência de fosfato natural reativo aplicado em misturas com superfosfato triplo em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 1092-1099, 2009. DOI: 10.1590/S0100-204X2009000900004

FROSSARD, E. *et al.* Processes governing phosphorus availability in temperate soils. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 29, p. 15–23, 2000.

GAMA-RODRIGUES, A. C. *et al.* An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, Amsterdam, v. 118, p. 453–469, 2014. DOI: 10.1007/s10533-013-9946-x.

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**, Viçosa, v. 32, p. 1753-1761, 2008.

GATIBONI, L. C. *et al.* Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 141-187, 2013.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 245 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

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**, Viçosa, v. 32, p. 1753-1761, 2008.

GATIBONI, L. C. *et al.* Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 691–699, 2007.

GATIBONI, L.C. *et al.* Superphosphate and Rock Phosphates as Phosphorus Sources for Grass-Clover Pasture on a Limed Acid Soil in Southern Brazil. **Communication in Soil Science and Plant Analyses**, New York, v. 34, p. 2503–2514, 2003. DOI:10.1081/CSS-120024782

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 in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 93, p. 215–225, 2012. DOI: [10.1007/s10705-012-9511-3](https://doi.org/10.1007/s10705-012-9511-3).

GUGGENBERGER, G. *et al.* Assessing the organic phosphorus status of an Oxisol under tropical pastures following native savanna using <sup>31</sup>P NMR spectroscopy. **Biology and Fertility Soils Journal**, Amsterdam, v. 23, n. 3, p. 332–339, 1996.

HASHIMOTO, Y. *et al.* Path analysis of phosphorus retention capacity 220 in allophanic and non-allophanic andisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, p. 441-448, 2012.

HAYGARTH, P. M.; BARDGETT, R. D.; CONDRON, L. M. Nitrogen and phosphorus cycles and their management. *In*: GREGORY, P. J.; NORTCLIFF, S. (ed.). **Soil Conditions and Plant Growth**. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2013. p. 132–159.

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 American Journal**, Madison, v. 46, p. 970-976, 1982.

HERRERA, W. F. B. *et al.* Rendimento das culturas e labilidade de fósforo no solo sob fertilizantes solúveis e complexos húmicos de fosfato. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, p. 1692 – 1702, 2016.

HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, Brunswick, N.J, v. 52, p. 463–471, 1991.



INDA JUNIOR, A.V. *et al.* Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, p. 1301-1307, 2007.

ISLAM, R.; REEDER, R. No-till and conservation agriculture in the United States: an example from the David Brandt farm, Carroll, Ohio. **International Soil and Water Conservation Research 2**, Amsterdam, v. 1, p. 97–107, 2014. DOI:10.1016/S2095-6339(15)30017-4.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, Pampulha, v. 5, p. 17–40, 1997.

KUO, S.; HUANG, B.; BEMBENEK, R. Effects of long-term phosphorus fertilization and winter cover cropping on soil phosphorus transformations in less weathered soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 41, p. 116–123, 2005.

LIMA FILHO, O. F. **O silício em sistemas intensivos de produção agropecuária**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 27.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 11.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 9.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 6., 2006, Bonito, MS. A busca das raízes: anais. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 82). 1 CD-ROM.

LINQUIST, B. A.; SINGLETON, P. W.; CASSMAN, K.G. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up decline of available phosphorus in an ultisol. **Soil Science**, Brunswick, N.J, v. 162, p. 254–264, 1997.

LIU, J. *et al.* Molecular speciation and transformation of soil legacy phosphorus with and without longterm phosphorus fertilization: Insights from bulk and microprobe spectroscopy. **Scientific Reports**, London, v. 7, p. 15354, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-13498-7.

MANDER, C. *et al.* Incidence and diversity of phosphate-solubilising bacteria are linked to phosphorus status in grassland soils. **Soil Biology Biochemistry**, Amsterdam, v. 44, p. 93–101, 2012. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.09.009.

MARCOLAN, A. L. **Suprimento e absorção de fósforo em solos submetidos a diferentes sistemas de preparo**. 2006. 124 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MOREIRA, A. *et al.* Agronomic Efficiency of Two Types of Lime and Phosphate Fertilizer Sources in Brazilian Cerrado Soils Cultivated with Soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 45, p. 2319–2330, 2014.

MOTTA, P. E. F. *et al.* Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 349–359, 2002.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, 1962.

NICOLODI, M. *et al.* Adubação do sistema de cultivo e adubação por cultura, na linha de semeadura, no trigo cultivado em solo com alta fertilidade sob sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, Passo Fundo, ed. 157, p. 6 -19, 2017.

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

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 1, p. 471-550.

NYE, P. H.; TINKER, P. B. **Solute movement in the soil-root system**. Berkeley: University of California Press, 1977. 342 p.

OLIBONE, D.; ROSOLEM, C. A. Phosphate fertilization and phosphorus forms in an Oxisol under no-till. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 4, p. 465-471, 2010.

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E.; Phosphorus. Methods of Soil Analysis, Part 2. *In*: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, Q. R. (ed.). **Chemical and Microbiological Properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1982. p. 403-430.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.105, p.149-155, 2009. DOI: 10.1016/j. still.2009.07.001.

PEARSE, S. J. *et al.* Carboxylate composition of root exudates does not relate consistently to a crop species' lability to use phosphorus from aluminum, iron or calcium phosphate sources. **New Phytologist**, Oxford, v. 173, p. 181–190, 2007.

PYPERS, P. *et al.*, Changes in mineral nitrogen, phosphorus availability and salt-extractable aluminium following the application of green manure residues in two weathered soils of South Vietnam. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 37 n. 1, p. 163–172, 2005.

RAIJ, V. B. (ed.). *et al.* **Análise química para avaliação da fertilidade em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

REDEL, Y. D. *et al.* Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 39, p. 388–396, 2007.

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

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

RHEINHEIMER, D. S., ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, p. 2339–2354, 2003.

RHEINHEIMER, D. S., ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo (Distribution of inorganic phosphorus fraction in soil management systems). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 36, p. 151–160, 2001.

RHEINHEIMER, D. S., ANGHINONI, I., FLORES, A. F. Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 33, p. 1853–1871, 2002.

RHEINHEIMER, D. S., GATIBONI, L. C., KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto (Factors affecting the phosphorus availability and the fertilization management in no-tillage system). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38 n. 2, p. 576–586, 2008.

RHEINHEIMER, D. S. *et al.* Amplitude do fósforo microbiano em um Argissolo em pastagem nativa submetida à roçada e à introdução de espécies forrageiras com fertilização fosfatada em diferentes épocas. **Acta Scientiarum Agronomic.**, Maringá, v. 30, p. 561-567, 2008.

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 156, p. 989–996, 2011. DOI: 10.1104/pp.111.175448

RODRIGUES, M. *et al.* Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Scient Total Environment**, Amsterdam, v. 542, p. 1050-1061, 2016.

ROWE, H. *et al.*, Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 104, p. 393–412, 2016.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; FRANZ, C. A. B. **Manejo e conservação do solo e da água em sistema de plantio direto no Cerrado**. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2009. 53 p. (Documentos, n. 258).

SALES, M. V. S. *et al.* Respecification of structural equation models for the P cycle in tropical soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 102, p. 347–358, 2015. DOI: 10.1007/s10705-015-9706-5.

SANTOS, J. Z. L. *et al.* Frações de fósforo em solo adubado com fosfato em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 705-714, 2008.

SANTOS, W. O. *et al.* Increasing soluble phosphate species by treatment of phosphate rocks with acidic waste. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 45, p. 1988-1997, 2016.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 58, p. 151-199, 1997.

SCHMITT, D. E. *et al.* Accumulation of phosphorus fractions and contamination potential in vineyard soils in the southern region of the state of Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1256–1266, 2013. DOI : 10.1590/S0100-06832013000500015.

SHIPLEY, B. **Cause and correlation in biology**: a user's guide to path analysis, structural equations and causal inference with R. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2016. 325 p.

SILVA, M.C. **Termofosfato de alumínio nas culturas do feijão, soja e sorgo em solos de cerrado**. 2014. 72 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SOLTANGHEISI, A. *et al.* Forest conversion to pasture affects soil phosphorus dynamics and nutritional status in Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, [Art.] 104330, 2019. (Online)

SOLTANGHEISI, A. *et al.* Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 179: p. 20–28, 2018.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A.; LOBATO, E. Solubilidade e eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos avaliados com a cultura da soja em um Latossolo de Cerrado. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE SAVANAS TROPICAIS, 2., Brasília, 2008. Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais: **Anais [...]**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. CD ROM.

SOUSA, D. M. G. *et al.* Fósforo. *In*. PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2010. 362 p.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. *In*: MATSUO, T. *et al.* **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. cap. 5, p. 420-433.

TAKEDA, M. *et al.* Phosphorus transformation in a soybean-cropping system in Andosol: effects of winter cover cropping and compost application. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 85, p. 287–297, 2009.

TELES, A. P. B. *et al.* Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? **Soil Use and Management**, Hoboken, p. 1–11, 2017. DOI: 10.1111/sum.12327.

TIECHER, T. *et al.* Assessing linkage between soil phosphorus forms in contrasting tillage systems by path analysis. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, p. 276–280, 2018.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long-term experiment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, p. 271–281, 2012b.

TIECHER, T. *et al.* Forms of inorganic phosphorus in soil under different long-term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.36, p. 271–281, 2012a

TIECHER, T. *et al.* Phosphorus accumulation in a southern Brazilian Ultisol amended with pig manure for nine years. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 78, n. 3, [Art.] e20190157 2021. DOI: 10.1590/1678-992X-2019-0157

TURNER, B. L. *et al.* Extraction of soil organic phosphorus. **Talanta**, Amsterdam, v. 66, p. 294- 306, 2005. DOI: 10.1016/j.talanta.2004.11.012

TIESSEN, H., MOIR, J. O. Characterization of available P by sequential extraction. *In*: Carter, M. R. (ed.). **Soil Sampling and Methods of Analysis Canadian Society of Soil Science**. Lewis Publications: Boca Raton, 1993. p. 75–86.

TOKURA, A.M. *et al.*; Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 467-1472, 2002.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L. H. C. Phosphate sorption in low activity clay soils. **Bragantia**, Campinas, v. 62, p. 111-118, 2003.

VIEIRA, R. C. B. **Recomendação de adubação fosfatada e potássica para rotação de culturas em Latossolos em plantio direto de longa duração no centro-sul do Paraná**. 2014. 81 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

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 Ciências do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 794-808, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbcs20140463.

VU, D. T.; TANG, C.; ARMSTRONG, R. D. Transformations and availability of phosphorus in three contrasting soil types from native and farming systems: a study using fractionation and isotopic labeling techniques, **Journal of Soils and Sediments**, Landsberg, v. 10, p. 18–29, 2010.

WANG, J. *et al.* Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-years superphosphate application. **Pedosphere**, Beijing, v. 20, p. 304-310, 2010.

WERNER, D.; ROTH, R. Silica metabolism. *In*: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. **Encyclopedia of plant physiology**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. v. 15B, p. 682-694.

WITHERS P.J.A. *et al.*, Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, London, v. 8, [Art.] 2537, 2018. (Online) DOI: 10.1038/s41598-018-20887-z

YANG, X.; POST, W. N. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: a synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. **Biogeosciences**, Katlenburg-Lindau, v. 8, p. 2907–2916, 2011.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I.; ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, p. 131-138, 2008.

ZHANG, T.Q.; MACKENZIE, A. F. Changes of soil phosphorous fractions under long-term corn monoculture. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 61, p. 485–493, 1997.

ZHENG, Z. *et al.* Pathways of soil phosphorus transformations after 8 years of cultivation under contrasting cropping practices. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 66, p. 999–1007, 2002.