RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 24/10/2027

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until October 24, 2027

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

LUCAS JÓNATAN RODRIGUES DA SILVA

INTERAÇÃO FOSFATO × SILICATO: IMPLICAÇÕES NA SORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS TROPICAIS E NA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS

Botucatu
2025

LUCAS JÓNATAN RODRIGUES DA SILVA

INTERAÇÃO FOSFATO × SILICATO: IMPLICAÇÕES NA SORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS TROPICAIS E NA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Theodoro Büll

Coorientador(a): Prof. Dr. Gustavo Rocha de Castro

Botucatu

2025

D229i

da Silva, Lucas Jónatan Rodrigues
Interação Fosfato x silicato: Implicações na sorção de fósforo em solos tropicais e na eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados / Lucas Jónatan Rodrigues da Silva. -- Botucatu, 2025
154 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: Leonardo Theodoro Büll
Coorientador: Gustavo Rocha de Castro

1. Solos tropicais. 2. Sorção de fosfato. 3. Silicato. 4. Eficiência Agronômica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

Impacto potencial desta pesquisa

A baixa disponibilidade de fósforo (P) em solos tropicais altamente intemperizados constitui uma das principais limitações à produtividade agrícola nos trópicos, devido à elevada capacidade de sorção desse nutriente por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Compreender os mecanismos que regem a sorção de P, bem como os atributos químicos do solo que modulam essa dinâmica, é essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis em solos brasileiros.

Nesse contexto, o uso de fontes alternativas de fósforo, como o fosfato natural reativo e o termofosfato magnesiano, configura-se como uma alternativa viável ao uso exclusivo de fertilizantes altamente solúveis, como o superfosfato triplo. A aplicação dessas fontes de liberação lenta, associada ao uso de corretivos silicatados, representa uma estratégia promissora para aumentar a eficiência de uso do fósforo, reduzir a dependência de fertilizantes solúveis de alto custo e mitigar os impactos ambientais relacionados ao acúmulo de fósforo legado no solo.

Tais práticas são particularmente relevantes em sistemas de produção intensivos, como os de pastagens e grãos no Cerrado brasileiro, onde a sustentabilidade do uso do fósforo desponta como um dos principais desafios agronômicos do século XXI.

Por fim, esta pesquisa pode contribuir para a identificação dos principais atributos químicos do solo que afetam a sorção de fósforo, além de subsidiar estratégias de manejo baseadas no uso de fontes com liberação gradual de P em solos tropicais.

Potential Impact of this research

The low availability of phosphorus (P) in highly weathered tropical soils is one of the main limitations to agricultural productivity in the tropics, due to the high adsorption capacity of this nutrient by iron and aluminum oxides and hydroxides. Understanding the mechanisms that govern P adsorption, as well as the soil chemical attributes that modulate this dynamic, is essential for the development of more efficient and sustainable management strategies in Brazilian soils.

In this context, the use of alternative phosphorus sources, such as reactive rock phosphate and magnesium thermophosphate, emerges as a viable option to the exclusive use of highly soluble fertilizers, such as triple superphosphate. The

application of these slow-release sources, combined with the use of silicate amendments, represents a promising strategy to improve phosphorus use efficiency, reduce dependence on costly soluble fertilizers, and mitigate the environmental impacts associated with the accumulation of legacy phosphorus in the soil.

These practices are particularly relevant in intensive production systems, such as pasture and grain cropping in the Brazilian Cerrado, where the sustainability of phosphorus use stands out as one of the main agronomic challenges of the 21st century.

Finally, this research may contribute to identifying the key soil chemical attributes that influence phosphorus adsorption, in addition to supporting management strategies based on the use of gradually available P sources in tropical soils.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE:

INTERAÇÃO FOSFATO X SILICATO: IMPLICAÇÕES NA SORÇÃO DE FÓSFORO E NA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS

AUTOR: LUCAS JÔNATAN RODRIGUES DA SILVA
ORIENTADOR: LEONARDO THEODORO BÜLL
COORIENTADOR: GUSTAVO ROCHA DE CASTRO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Agricultura), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LEONARDO THEODORO BÜLL (Participação Presencial)
Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - Unesp

Prof. Dr. JOÃO ARTHUR ANTONANGELO (Participação Virtual)
Department of Crop and Soil Sciences / Washington State University

Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES (Participação Presencial)
Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - Unesp

Angelica Cristina Fernandes Deus
Profa. Dra. ANGÉLICA CRISTINA FERNANDES DEUS (Participação Presencial)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp

Prof. Dr. MARCELO EDUARDO ALVES (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Exatas / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP

Botucatu, 24 de outubro de 2025

Aos meus amados pais,

Jurandir e Silvânia,

dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pelo privilégio de desfrutar das melhores bênçãos preparadas para mim.

Aos meus pais, Silvânia Lúcia e Jurandir Rafael, pelo amor e apoio incondicional, por me mostrarem através de suas mãos calejadas da labuta na roça, que a honestidade, o trabalho e humildade são as maiores virtudes que um homem pode ter.

À minha família, em especial à minha noiva Letícia, ao meu irmão Sandro e aos meus avós, Severino Rodrigues, Julia Ernestina, Helena Rafael (in memoriam) e José Justino (in memoriam).

Ao Prof. Dr. Leonardo Theodoro Büll, pela orientação, pelos ensinamentos transmitidos e pelas oportunidades que contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Prof. Dr. Gustavo Rocha, pela coorientação, bem como ao seu grupo de pesquisa, em especial à Adrielli, Tom e Barbara.

Aos meus bons amigos da sala de pós-graduação, especialmente Ana Paula, Carla, Francimalba, Lucas, Oziel, Olavo, Laudelino, Tatiane e Lusiane. Aos estagiários João Vitor, Isabella, Marina, Murilo e Tainah, pelo suporte nas pesquisas e pelos valiosos momentos de aprendizado e boas risadas no laboratório.

A todos os professores, técnicos e pós-graduandos do Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de estudos concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de pesquisa (Processo nº 2023/10749-0). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Por fim, registro meus agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação profissional e humana.

“Se vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

NEWTON, I. *Carta a Robert Hooke*. 15 fev. 1676. Disponível em: https://cudl.lib.cam.ac.uk/view/MS-ADD-03958/15. Acesso em: 21 jul. 2025.

RESUMO

A disponibilidade de fósforo (P) em solos tropicais é limitada pelo elevado grau de intemperismo sofrido por estes solos. Este trabalho avaliou a sorção de P em diferentes solos tropicais e a influência do silicato nas formas de P, integrando aspectos químicos, físicos e mineralógicos em quatro experimentos. No primeiro experimento, 17 solos de distintas classes e texturas foram caracterizados quanto a capacidade máxima de sorção, através de isotermas de Langmuir e Freundlich, cinéticas de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, espectroscopia FTIR e fracionamento sequencial. A capacidade máxima de sorção (75.95 to 1149.49 mg kg^{-1}) foi maior nos Inceptisols (aq) e Oxisols argilosos. A cinética de pseudo-segunda ordem descreveu melhor a sorção, indicando quimissorção predominante. Os espectros FTIR evidenciaram grupos funcionais (Al–OH, Fe–OH, carboxílicos) associados à retenção de P, com predomínio de frações ocluídas (>60%) e baixo P lábil (<8%). No segundo experimento, avaliou-se a aplicação de fontes de P: i) superfosfato triplo (TSP), fosfato reativo (RP) e termofosfato magnesiano (MT), combinadas a corretivos de acidez (calcário ou wollastonita) em dois solos contrastantes. O MT + calcário aumentou Ca, Mg e S no solo argiloso. Em solo arenoso, as frações lábeis de P foram superiores com TSP + wollastonita, MT + calcário e RP + wollastonita. No terceiro experimento, avaliou-se a produção, atributos morfofisiológicos e eficiência de uso do P de *Urochloa brizantha* em dois solos contrastantes. Fontes alternativas apresentaram eficiências (83,7–89,9%) comparáveis ao TSP (88,4%), com maior eficiência acumulada no solo arenoso. O manejo integrado de corretivos (calcário e wollastonita) e fontes alternativas (RP e MT) melhora a disponibilidade e a eficiência de uso de P, configurando estratégia sustentável para solos tropicais. No quarto experimento, avaliou-se a cinética de sorção de Si e o efeito da aplicação de Si sobre a capacidade máxima de sorção de P em seis solos com mineralogia contrastante. O modelo de Elovich apresentou os melhores ajustes para descrever o processo cinético de sorção de Si nos solos (R^2 = 0,81–0,98), confirmando superfícies de sorção heterogêneas. As isotermas de sorção ajustadas aos modelos de Freundlich e Langmuir, principalmente em Nitossolos e Latossolos (15-27%). As análises de regressão demonstraram que o aumento das doses de P, aumentam os teores de Si em solução, enquanto doses elevadas de P (> 60 mg L^{-1}), reduzem a disponibilidade de Si, provavelmente devido a polimerização. Novos estudos em condições de campo devem ser realizados, considerando o pH e a dinâmica de Si em solução.

Palavras-chave: sorção de fósforo; silicato; solos tropicais; eficiência agronômica.

ABSTRACT

The availability of phosphorus (P) in tropical soils is limited by the high degree of weathering these soils have undergone. This study evaluated P adsorption in different tropical soils and the influence of silicate on P forms, integrating chemical, physical, and mineralogical aspects across four experiments. In the first experiment, 17 soils of distinct classes and textures were characterized for maximum adsorption capacity using Langmuir and Freundlich isotherms, pseudo-first- and pseudo-second-order kinetics, FTIR spectroscopy, and sequential fractionation. Maximum adsorption capacity (75.95 to 1149.49 mg kg^{-1}) was greater in Inceptisol (aq) and clayey Oxisols. Pseudo-second-order kinetics best described sorption, indicating predominant chemisorption. FTIR spectra revealed functional groups (Al–OH, Fe–OH, carboxylic) associated with P retention, with predominance of occluded fractions (>60%) and low labile P (<8%). In the second experiment, P sources were evaluated: (i) triple superphosphate (TSP), reactive phosphate rock (RP), and magnesium thermophosphate (MT), combined with soil acidity amendments (limestone or wollastonite) in two contrasting soils. MT + limestone increased Ca, Mg, and S in the clayey soil. In the sandy soil, labile P fractions were higher under TSP + wollastonite, MT + limestone, and RP + wollastonite. In the third experiment, the production, morphophysiological traits, and P use efficiency of *Urochloa brizantha* were assessed in two contrasting soils. Alternative P sources showed efficiencies (83.7–89.9%) comparable to TSP (88.4%), with higher cumulative efficiency in the sandy soil. Integrated management with amendments (limestone and wollastonite) and alternative P sources (RP and MT) enhanced P availability and use efficiency, representing a sustainable strategy for tropical soils. In the fourth experiment, Si adsorption kinetics and the effect of Si application on the maximum P adsorption capacity were evaluated in six soils with contrasting mineralogy. The Elovich model provided the best fit to describe Si adsorption kinetics (R^2 = 0.81–0.98), confirming heterogeneous adsorption surfaces. Adsorption isotherms were best fitted by Freundlich and Langmuir models, especially in Oxisols (15–27%). Regression analyses showed that increasing P rates raised Si concentrations in solution, while higher P levels (>60 mg L^{-1}) reduced Si availability, likely due to polymerization. Further field studies are needed to consider pH and Si dynamics in soil solution.

Keywords: phosphorus sorption; silicate; tropical soils; agronomic efficiency.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO GERAL.....	**21**
	CAPÍTULO 1 - SOIL CHEMICAL PROPERTIES EFFECT ON PHOSPHORUS FRACTIONS AND MAXIMUM ADSORPTION CAPACITY IN BRAZILIAN TROPICAL……...	**25**
1.1	INTRODUCTION……..	26
1.2	MATERIAL AND METHODS……..	28
1.2.1	Soil samples collection and physical-chemical properties……	29
1.2.2	Fourier Transform Infrared- FTIR analysis……..	32
1.2.3	Kinetic adsorption model…….	32
1.2.4	Maximum phosphorus adsorption capacity (MPAC) and remaining P (P-rem)……...	33
1.2.5	Soil phosphorus fractions……	34
1.2.6	Statistical analysis……...	35
1.3	RESULTS……..	36
1.3.1	Maximum phosphorus adsorption capacity (MPAC) and remaining P (P-rem)……...	36
1.3.2	Phosphorus kinetic models…….	39
1.3.3	Fourier transform infrared- FTIR analysis…….	41
1.3.4	Soil phosphorus fractions……	43
1.3.5	Principal component analysis…….	46
1.3.6	Spearman correlation……..	47
1.4	DISCUSSION……	48
1.5	CONCLUSIONS……...	52
1.6	REFERENCES…….	53
	Supplementary material…….....	58
	CAPÍTULO 2 - SOIL PHOSPHORUS FRACTIONS: EFFECTS OF SILICATE AMENDMENTS AND PHOSPHORUS SOURCES IN BRAZILIAN TROPICAL SOILS……	**59**
2.1	INTRODUCTION…….…….	60
2.2	MATERIAL AND METHODS……..	62
2.2.1	Soil chemical attributes……..	62

2.2.2 Soil pH amendments and P sources……. 63
2.2.3 Remaining P (P.rem) and Maximum P adsorption capacity (MPAC) 64
2.2.4 Greenhouse experiment…….. 67
2.2.5 Treatments and experimental design…… 67
2.2.7 Phosphorus fractions……... 69
2.2.8 Cumulative biomass production and phosphorus accumulation…… 70
2.2.9 Statistical analysis…… 71
2.3 RESULTS…….. 71
2.3.1 The effect of acidity correction and P sources application on soil chemical properties…….. 71
2.3.2 Effect of soil pH amendments and P sources application in P fractions 75
2.3.2.1 Labile P fraction…… 75
2.3.2.2 Moderately Labile P……. 77
2.3.2.3 Non-labile P (Occluded P)…….. 79
2.3.2.4 Cumulative P fraction……..... 81
2.3.2.5 Cumulative Biomass and phosphorus accumulation…….. 81
2.3.2.6 Correlation between soil chemical properties, P fractions, biomass and P accumulation…….. 82
2.4 DISCUSSION…… 83
2.5 CONCLUSION……..…… 88
2.6 REFERENCES……. 89
Supplementary material……..... 96
CAPÍTULO 3 - SUSTAINABLE PHOSPHORUS MANAGEMENT IN TROPICAL SOILS: INTEGRATING ALTERNATIVE SOURCES AND SILICON AMENDMENTS 98
3.1 INTRODUCTION…….. 99
3.2 MATERIAL AND METHODS…….. 100
3.2.1 Soil chemical attributes…… 100
3.2.2 Experiment conduction…… 101
3.2.3 Treatments and experimental design…… 102
3.2.3 Plant physiological and morphological attributes……. 102
3.2.4 Biomass yield, nutrient accumulation and bromatological analysis….. 103
3.2.5 Agronomic efficiency and phosphorus use efficiency……. 103

3.2.6 Statistical analysis……..... 104
3.3 RESULTS……..… 104
3.3.1 Plant height and SPAD index……. 104
3.3.2 Biomass production and nutrient accumulation……... 107
3.3.3 Efficiency in the phosphorus use…… 113
3.3.6 Multivariate analysis……. 117
3.4 DISCUSSION……..…… 121
3.5 CONCLUSION…….…… 122
3.6 REFERENCES…….…… 124
CAPÍTULO 4 - PHOSPHATE AND SILICATE COMPETITIVE ADSORPTION IN BRAZILIAN SOILS: KINETIC AND BATCH EQUILIBRIUM APPROACHES……. 126
4.1 INTRODUCTION…….. 126
4.2 MATERIAL AND METHODS……..... 128
4.2.1 Soil sample…… 128
4.2.2 Points of zero charge and of zero salt effect…… 129
4.2.3 X-ray diffraction analysis……. 130
4.2.3 Silicon adsorption kinetic……. 131
4.2.4 Remaining Si (Si-rem) and remaining P (P-rem)……. 132
4.2.5 Competitive adsorption systems…… 132
4.2.6 Statistical analysis…… 133
4.3 RESULTS…….. 134
4.3.1 Silicon adsorption kinetic……. 134
4.3.2 Remaining Si (Si-rem) and remaining P (P-rem)……..…… 137
4.3.3 Effect of silicon addition in maximum phosphorus adsorption…… 138
4.3.4 Effect of increases P concentration in Si availability…….. 142
4.4 DISCUSSION…… 143
4.5 CONCLUSION……..…… 147
4.6 REFERENCES…… 147
Supplementary material……..... 151
CONSIDERAÇÕES FINAIS……... 152
REFERÊNCIAS…… 153

INTRODUÇÃO GERAL

A segurança alimentar mundial constitui um dos principais desafios da humanidade nas próximas décadas, em razão do crescimento exponencial da população (Wang; Xiong; He, 2020). O uso de fertilizantes é essencial para o incremento da produção agrícola e, entre os fertilizantes mais demandados, destacam-se os fosfatados. De acordo com a FAO (2022), a produção de fertilizantes fosfatados em 2020 superou 44 milhões de toneladas. Países tropicais, como o Brasil, apresentam elevada demanda por fertilizantes fosfatados e, consequentemente, forte dependência do mercado externo. Conforme Withers *et al.* (2018), cerca de 60% dos fertilizantes fosfatados utilizados no país são importados.

A elevada demanda por fertilizantes fosfatados no Brasil deve-se, sobretudo, às características dos solos, como alto grau de intemperismo, baixa fertilidade natural, acidez elevada e presença de cargas variáveis (Frazão *et al.* 2019). Tais atributos influenciam diretamente a disponibilidade dos fertilizantes aplicados. A principal explicação para a baixa eficiência dos fertilizantes fosfatados é a rápida reação do fósforo com a matriz do solo, resultando em sua sorção. Trata-se de um conjunto de reações químicas nas quais as superfícies adsorventes são representadas, principalmente, por óxidos de ferro e alumínio, enquanto os íons fosfato retidos nesses complexos são denominados adsorvatos. A sorção ocorre, em grande parte, devido às imperfeições ou à presença de microporos nas superfícies minerais, o que favorece a difusão do adsorvato para o interior do adsorvente (Baumann *et al.* 2020).

A fase inicial da sorção do fósforo por oxidróxidos de ferro e alumínio e por argilominerais ocorre por atração eletrostática (complexação de esfera externa), seguida por troca de ligantes, processo denominado quimissorção. De modo geral, a troca de ligantes ocorre entre grupos OH^- e OH_2^+ e os íons fosfato presentes na solução do solo, formando ligações relativamente fortes (covalentes), caracterizadas como complexos de esfera interna. Segundo Penn e Camberato (2019), a troca de ligantes pode influenciar diretamente a sorção do fósforo pelos minerais ou mesmo sua oclusão, processo mais lento e posterior à sorção inicial.

Mendez *et al.* (2022) destacam que o processo de quimissorção é determinado por diversos fatores relacionados às quantidades e propriedades da fase mineral e às características químicas da solução do solo, como pH, força iônica e tipo e concentração de íons. Assim, o íon fosfato presente na solução desloca hidroxilas

das estruturas dos hidróxidos de Fe e Al, passando a integrar essas estruturas, caracterizando um fenômeno de esfera interna e tornando-se indisponível às plantas. Esses processos reduzem significativamente a eficiência da adubação fosfatada, exigindo aplicações anuais superiores às exigências nutricionais da maioria das culturas.

De acordo com Carneiro *et al.* (2021), apenas 10 a 20% do fósforo aplicado é efetivamente aproveitado pelas culturas na primeira safra; o restante é adsorvido em formas momentaneamente disponíveis, mas, com o aumento do tempo de contato e a deposição de novas camadas de óxidos de ferro, ocorre a oclusão do fósforo no solo. Segundo Pavinato *et al.* (2020), o processo de sorção de fósforo em solos agrícolas brasileiros possui impacto econômico significativo, estimado em 22 bilhões de dólares, podendo alcançar até 70 bilhões de dólares em 2050.

A alta demanda do mercado interno por fertilizantes fosfatados sofre influência direta das instabilidades do mercado externo. Recentemente, as tensões geopolíticas entre Rússia e Ucrânia provocaram instabilidade no comércio de fertilizantes e, como consequência, observou-se aumento de aproximadamente 145% no preço do superfosfato. Isso se deve, principalmente, a dois fatores: (i) a importação direta de fertilizantes (incluindo superfosfato triplo, da Rússia), responsável por cerca de 21% desse mercado, sendo o quinto maior produtor mundial de rochas fosfáticas; e (ii) a dependência do enxofre elementar para a produção de ácido sulfúrico, necessário à digestão das rochas fosfáticas, sendo a Rússia o terceiro maior produtor mundial de enxofre (USGS, 2022).

Recentemente, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) lançou o Plano Nacional de Fertilizantes, com o objetivo principal de reduzir a dependência de fertilizantes importados, que atualmente ultrapassa 80%. Segundo o MAPA (2022), o Plano Nacional de Fertilizantes visa otimizar pesquisas e tecnologias para a produção de fertilizantes, considerando as condições agrícolas brasileiras. Entre as principais diretrizes, destaca-se: “Estimular e ampliar a pesquisa, exploração e transformação mineral no Brasil, oferecendo fontes competitivas de P_2O_5 e K_2O para a agricultura nacional, visando reduzir a dependência de importação de fertilizantes”.

Em consonância com essa proposta, alternativas de fertilizantes fosfatados de liberação lenta vêm sendo estudadas, principalmente por utilizarem matéria-prima nacional e apresentarem maior disponibilidade de recursos ao longo do tempo. Entre essas alternativas, os fertilizantes termofosfatados apresentam vantagens devido à

menor velocidade de solubilização, o que reduz os processos de sorção e aumenta a eficiência da adubação fosfatada. Quando manejadas adequadamente, essas fontes podem disponibilizar fósforo de forma contínua, atendendo às demandas das culturas (SOMAVILLA *et al.* 2021).

Essas fontes apresentam silicato em sua composição, que tem demonstrado efeitos positivos no aumento da disponibilidade de fósforo no solo. Estudos recentes (Sandim *et al.* 2014; Schaller *et al.* 2019; Deus *et al.* 2020; Gunnarsen *et al.* 2022) demonstraram que a aplicação de silicato pode reduzir o processo de sorção e aumentar os teores de fósforo em solução, prontamente disponível para absorção pelas culturas. Isso ocorre por duas razões principais: (i) a capacidade do ânion SiO_4^{4-} competir com o fósforo por sítios de sorção nas monocamadas dos argilominerais e hidro(óxidos) de Fe e Al; e (ii) a ação corretiva do silicato na acidez do solo, decorrente da reação do ânion SiO_3^{2-} com H_2O, formando OH^- e reduzindo a atração eletrostática do íon fosfato (Castro *et al.* 2016).

Outra vantagem do uso de silicato como corretivo de acidez é a disponibilidade de silício. O silício é considerado um elemento benéfico ao desenvolvimento vegetal, pois contribui para o fortalecimento da parede celular, conferindo maior rigidez e proteção contra doenças, pragas e danos mecânicos (Bhardwaj *et al.* 2022). Além disso, o silício pode proteger o aparelho fotossintético contra espécies reativas de oxigênio (EROS), aumentar a eficiência no uso da água e o transporte de elétrons, bem como atuar na regulação de genes e na absorção e transporte de macro e micronutrientes e fitohormônios que influenciam a atividade fotossintética (Rastogi *et al.* 2021).

O uso do silício também vem sendo testado na composição de fertilizantes. De acordo com Ávila (2016), a utilização de silício na formulação de um fertilizante fosfatado proporcionou aproveitamento de fósforo de até 26,17%, aumento nos teores de fósforo acumulado em plantas de milho e eficiência agronômica de até 119% em relação ao uso do MAP. Estudos conduzidos por Sanagioto *et al.* (2022) demonstraram que a aplicação de termofosfato na dose de 140 kg ha^{-1} de P_2O_5 na cultura do arroz incrementou a produção em 45%, o número de espigas em 29% e o número de grãos cheios por espiga em 53%. Avaliando diferentes formas de aplicação de fertilizantes fosfatados (a lanço, no sulco e de forma parcelada), Resende *et al.* (2006) observaram que o termofosfato apresentou eficiência agronômica 14% superior ao superfosfato triplo em três anos de cultivo de milho em solos do Cerrado.

Entretanto, estudos recentes realizados por Moretto (2017) indicam que a resposta à aplicação de termofosfato depende do teor inicial de fósforo no solo. Segundo essa pesquisadora, a adubação com termofosfato magnesiano e potássico em solos com teor médio de fósforo apresentou eficiências agronômicas de 116% e 106%, respectivamente, superiores à fonte convencional (superfosfato triplo).

Um dos principais gargalos para o uso de silicato em Latossolos é o reduzido número de informações sobre a dinâmica silicato × fosfato nesses solos. Assim, estudos que descrevam essa interação têm aplicação direta no manejo eficiente de fertilizantes fosfatados, podendo contribuir para o desenvolvimento de métodos e recomendações de adubação de fósforo em solos corrigidos com silício ou mesmo para o manejo de fertilizantes fosfatados enriquecidos com silício.

A integração de estudos de isotermas de sorção e difusão de fósforo na presença de silício, aliada a abordagens em escala molecular por meio de espectroscopia, permite maior compreensão das interações em nível eletrostático e de esfera interna, considerando os aspectos químicos envolvidos (Szerlag *et al.* 2022). A elucidação dos processos que regem essa interação poderá contribuir para o manejo do silício combinado com fertilizantes fosfatados, aumentando a eficiência agronômica desses insumos a partir da interação com o silicato.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disponibilidade de fósforo em solos tropicais é fortemente condicionada por atributos mineralógicos e químicos, como o teor de argila, a matéria orgânica e os óxidos de ferro e alumínio. A predominância de processos de quimissorção, evidenciada pelos ajustes ao modelo cinético de pseudo-segunda ordem e pelas análises de FTIR, reforça a necessidade de estratégias de manejo que reduzam as perdas de P por fixação em solos altamente intemperizados.

A aplicação de corretivos de acidez, associada a fontes alternativas de fósforo como o fosfato reativo, mostrou-se eficaz em manter e tamponar as frações lábeis de P ao longo dos ciclos produtivos, favorecendo o crescimento de *Urochloa brizantha* e o acúmulo de biomassa.

Além disso, o efeito residual das fontes menos solúveis, como MT e RP, destacou-se em solos arenosos, enquanto a combinação entre TSP e corretivos foi mais eficiente em solos argilosos. Esses resultados indicam que estratégias integradas de manejo, considerando a mineralogia e textura do solo, podem otimizar a eficiência de uso do fósforo (PUE), reduzir custos e mitigar impactos ambientais.

Os resultados dos experimentos cinéticos de Si em diferentes tipos de solos, evidenciam os efeitos da mineralogia sobre a dinâmica de Si no solo. Quando avaliada a interação Si e P por meio de abordagens competitivas, observou-se que o P desloca o Si com maior facilidade, e as evidências apontam reações posteriores de polimerização.

Portanto, a integração de fontes solúveis e alternativas de P, aliada à aplicação de silício, representa uma abordagem promissora para aumentar a sustentabilidade do uso do fósforo em sistemas tropicais. Estudos futuros devem aprofundar os mecanismos envolvidos na interação silício-fósforo, incluindo a dinâmica rizosférica, a arquitetura radicular e o papel de comunidades microbianas, especialmente sob condições de menor aporte de fertilizantes.

REFERÊNCIAS

ÁVILA, Marco Antônio Pereira de. **Influência do silício sobre a difusão do fósforo no solo e na eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados granulados**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

BAUMANN, K. *et al.* Speciation and sorption of phosphorus in agricultural soil profiles of redoximorphic character. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 42, n. 10, p. 3231-3246, 2020.

BHARDWAJ, S. *et al.* Physiological and molecular insights into the role of silicon in improving plant performance under abiotic stresses. **Plant and Soil**, p. 1-19, 2022.
BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Fertilizantes**. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/o-plano-nacional-de-fertilizantes. Acesso em: 25 ago. 2022.

CARNEIRO, J. S. S. *et al.* Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. **Science of the Total Environment**, v. 760, 143955, 2021.

CASTRO, G. S. A. *et al.* Surface application of limestone and calcium-magnesium silicate in a tropical no-tillage system. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 16, n. 2, p. 362-379, 2016.

DEUS, A. C. F. *et al.* Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. **Soil and Tillage Research**, v. 196, 104422, 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *FAOSTAT* **Statistical Database**. Roma: FAO, 2022. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#data/EF/visualize. Acesso em: 26 ago. 2022.

FRAZÃO, J. J. *et al.* Agronomic effectiveness of a granular poultry litter-derived organomineral phosphate fertilizer in tropical soils: Soil phosphorus fractionation and plant responses. **Geoderma**, v. 337, p. 582-593, 2019.

GUNNARSEN, K. C. *et al.* Can silicon in glacial rock flour enhance phosphorus availability in acidic tropical soil? **Plant and Soil**, p. 1-18, 2022.

MENDEZ, J. C. *et al.* Surface reactivity of the natural metal (hydr) oxides in weathered tropical soils. **Geoderma**, v. 406, 115517, 2022.

MORETTO, J. L. **Termofosfatos: eficiência agronômica e alterações químicas em solos com diferentes concentrações iniciais de fósforo**. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2017.
PAVINATO, P. S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2020.

PENN, C. J.; CAMBERATO, J. J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. **Agriculture**, v. 9, p. 120–138, 2019.

RASTOGI, A. *et al.* Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants...? **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 169, p. 40-48, 2021.

RESENDE, A. V. *et al.* Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 453-466, 2006.

SANDIM, A. S. *et al.* Disponibilidade de fósforo em razão da aplicação de calcário e silicatos em solos oxídicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1215-1222, 2014.

SANAGIOTTO, R. *et al.* Efeito do termofosfato em cobertura nos componentes de produção e produtividade de cultivares de arroz. **Nativa**, v. 10, n. 2, p. 163-169, 2022.

SCHALLER, J. *et al.* Silicon increases the phosphorus availability of Arctic soils. **Scientific Reports**, n. 9, p. 1-11, 2019.
SOMAVILLA, A. *et al.* P-legacy effect of soluble fertilizer added with limestone and phosphate rock on grassland soil in subtropical climate region. **Soil and Tillage Research**, v. 211, p. 105021, 2021.

SZERLAG, K. D. *et al.* Systematic study of legacy phosphorus (P) desorption mechanisms in high-P agricultural soils. **Minerals**, v. 12, n. 4, p. 458, 2022.