



Universidade Federal de São Carlos
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Curso de Engenharia Agrônômica



INGRID MARTINS STELUTTI

**ADSORÇÃO DE FÓSFORO E DESENVOLVIMENTO DO FEIJOEIRO-
COMUM (*Phaseolus vulgaris* L.) EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE
SILÍCIO EM LATOSSOLO**

ARARAS (SP)

2022



Universidade Federal de São Carlos
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Curso de Engenharia Agrônoma



INGRID MARTINS STELUTTI

**ADSORÇÃO DE FÓSFORO E DESENVOLVIMENTO DO FEIJOEIRO-
COMUM (*Phaseolus vulgaris* L.) EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE
SILÍCIO EM LATOSSOLO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Agrônoma – CCA – UFSCar para a obtenção do
título de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Roberto Soares

ARARAS (SP)

2022

À minha família, ao meu namorado, ao meu orientador e amigo Prof. Marcio e, aos (às) pesquisadores (as) da Ciência do Solo, dedico.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, Jane e José, por me apoiarem em todas as decisões tomadas e acreditarem em mim com uma confiança inabalável, sem vocês eu não estaria aqui. Às minhas irmãs, Yasmin e Iris, por compartilharem momentos de desafogo e compreensão mesmo à distância.

Ao meu namorado, Edmar, pelo suporte emocional diário, pelas dicas sugeridas e, pela paciência em estar ao meu lado nos momentos fáceis e nos mais desafiadores.

Ao professor e amigo Dr. Marcio Roberto Soares, que me acolheu como aluna desde 2017 e me mostrou o que é fundamental para ser uma melhor pessoa e pesquisadora. Obrigada pelos ensinamentos éticos e profissionais compartilhados, por me acompanhar nesta evolução, pelas risadas, pelos momentos difíceis e pelas superações. Espero levá-lo comigo a vida toda pois sou eternamente grata a você.

À toda a comunidade UFSCar, sejam eles funcionários, servidores, docentes e técnicos, pelos esforços diretos e indiretos que sustentaram o meu caminhar durante a graduação.

Ao Prof. Dr. Evandro Henrique Schinor, ao Prof. Dr. Victor Augusto Forti, à Prof. Dra. Patrícia Andrea Monquero, à Profa. Dra. Anastácia Fontanetti, ao Prof. Dr. Rodrigo Gazaffi e à Profa. Dra. Josiane Rodrigues pelo apoio físico ou intelectual durante a condução do projeto.

À Prof. Dra. Mariana Delgado, por me dizer em 2017 durante a disciplina de Solos 2, que eu deveria continuar me empenhando em estudar o que eu amo. Obrigada pelo conselho, eu resolvi segui-lo com muito carinho.

Às alunas Raquel Tessitore, Rafaela Maria Gomide da Silva e Ana Carolina da Cruz Alvez, que voluntariamente e guiadas pela vontade de aprender, me auxiliaram em várias etapas do projeto. Agradeço também as alunas Bruna Ferrari Schedenfeldt e Rafaela Oliva do Grupo

de Estudos em Ciências Agrárias (GECA).

À Céli, técnica do Laboratório de Ecotoxicologia e Química Ambiental (LEQA) da UFSCar – Araras, pelas conversas vespertinas e pela ajuda em fases decisivas do experimento.

À toda a equipe do Laboratório de Fertilidade do Solo da UFSCar – Araras, Prof. Dr. José Carlos Casagrande e aos técnicos Larissa, Fernanda e Roberto, pelo suporte e aprendizado na realização das análises do projeto.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica e por acreditar no potencial da nossa proposta.

Ao Célio da Sementes Orient, pelo fornecimento das sementes de feijão da cultivar BRS Estilo e pela troca de informações durante a condução do experimento.

Ao Adriano do Grupo Tavares Pinheiro, pela contribuição com a amostra de pó de rocha silicatada e, pela receptividade em cooperar com a nossa pesquisa.

À Lauany do Grupo Vittia, pelos problemas enfrentados, mas superados, para nos auxiliar com o inoculante para a cultura do feijão.

Ao Denis Polydoro da Agronelli Soluções, pela cooperação e abertura para a testagem do Agrosilício Plus® e, pela possibilidade de realizações de pesquisas futuras.

A todos vocês, muito obrigada!!!

“O ser humano é o que o solo faz dele.”

Ana Maria Primavesi

RESUMO

Uma das principais limitações ao crescimento e desenvolvimento vegetal do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) em solos brasileiros ácidos e altamente intemperizados é a baixa disponibilidade de fósforo (P) em solução, devido à fixação deste nutriente aos coloides do solo e à formação de compostos insolúveis com ferro (Fe) e alumínio (Al). Dentre as alternativas para aumentar a eficiência da adubação fosfatada destaca-se o uso de ânions competidores pelos sítios de adsorção do fosfato, tais como o silicato. A adição de silício (Si) ao solo pode ocorrer pela prática da rochagem, pela aplicação de pós de rochas silicatadas considerados subprodutos da mineração. Objetivou-se com esse trabalho avaliar o efeito da aplicação de fontes e doses de Si sobre a adsorção de P e o desenvolvimento do feijoeiro-comum (cultivar BRS Estilo) em Latossolo Vermelho Distrófico (LVd). O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em vasos de 11 dm³ (para cultivo do feijoeiro) e 1 dm³ (para análise de adsorção), com delineamento inteiramente casualizado arranjado em um esquema fatorial 5x2+2, com 11 repetições. Os tratamentos incluíram 5 doses (0, 200, 400, 600 e 800 kg ha⁻¹) e duas fontes de Si (convencional – Agrosilício Plus® e alternativa - pó de rocha silicatada). A adsorção de P pelas amostras de solo com diferentes doses e fontes de Si foi avaliada por experimentos de laboratório tipo *batch*, utilizando doses crescentes de P (0, 40, 80, 160, 320 e 640 mg L⁻¹), e os resultados foram ajustados ao modelo de Langmuir. Aos 53 dias do ciclo da cultura (pico do florescimento), a aplicação das duas fontes de Si não influenciou os parâmetros biométricos de diâmetro do caule, altura total de plantas e massa de matéria seca de parte aérea. O pó de rocha silicatada proporcionou maior acúmulo de massa de matéria fresca de parte aérea pelo feijoeiro-comum. O Agrosilício Plus® em doses crescentes favoreceu o aumento do Índice de Clorofila Falker total pelas plantas, diferentemente da fonte alternativa. O modelo não-linear de Langmuir se mostrou adequado para descrever a adsorção de P pelo LVd. O uso do Agrosilício Plus® e do pó de rocha silicatada não promoveu alterações no comportamento de adsorção e afinidade do P pelos coloides do solo.

Palavras-chave: adubação fosfatada; rochagem; isotermas de Langmuir; feijocultura; pó de rocha.

ABSTRACT

One of the main limitations to vegetal growth and development of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in acid and highly weathered Brazilian soils is the low availability of phosphorus (P) in solution, due to fixation of this nutrient in soils colloids and insoluble compounds formation with iron (Fe) and aluminum (Al). Among the alternatives to increase phosphate fertilization efficiency highlights the use of competing anions for phosphate adsorptions sites, such as silicate. The silicon (Si) addition in the soil can occur through the stonemeal technology, by the application of silicate rock powders considered as by-products of mining. The objective of this work was to evaluate the effect of Si sources and doses on P adsorption and on development of the common bean plants (cultivar BRS Estilo) on a Rhodic Hapludox soil . The experiment was conducted in a greenhouse, in pots of 11 dm³ (to grow the bean plants) and 1 dm³ (for adsorption analyses), with a completely randomized design in a factorial scheme 5 x 2 + 2, with 11 replications. Experimental treatments included five doses (0, 200, 400, 600, and 800 kg ha⁻¹) and two sources of Si (conventional – Agrosilício Plus® and alternative – silicate rock powder). The P adsorption by the soil samples with different doses and sources of Si was evaluated by batch laboratory experiments, using increasing P doses (0, 40, 80, 160, 320, and 640 mg L⁻¹), and the results were fitted by the Langmuir non-linear model. At 53 days after the plant emergency (peak flowering stage), the application of the two sources of Si did not affect the biometric parameters of stem diameter, plant total height, and shoot dry weight. The rock powder provided the highest shoot fresh weight of the common bean plants. The Agrosilício Plus® in increasing doses favored the increase of the total Falker Chlorophyll Index by plants, differently from the alternative source. The Langmuir non-linear model proved adequate to describe the P adsorption by the Rhodic Hapludox soil. The use of the Agrosilício Plus® and the silicate rock powder did not promote changes in the P adsorption parameters (maximum adsorption and affinity coefficient) by the soil colloids.

Keywords: phosphate fertilization; stonemeal; Langmuir isotherms; common bean crop; rock powder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Marchas de absorção de macronutrientes primários pelo feijoeiro-comum, cultivares a) Ouro Negro e b) Talismã, em sistema de plantio convencional na cidade de Lavras (MG)	19
Figura 2. Eficiência do uso de P (%) por diferentes culturas (soja, milho, cana-de-açúcar, café, algodão, trigo, feijão, laranja e arroz) entre os anos de 1960 e 2016	21
Figura 3. Mapa do “legado” de P acumulado durante o cultivo e adição de fertilizantes minerais fosfatados em áreas agrícolas brasileiras durante o período de 1960 a 2016	22
Figura 4. Formas de P na interação solo-planta	24
Figura 5. Coordenadas geográficas da casa de vegetação na UFSCar – Araras	33
Figura 6. Aplicação do Agrosilício Plus® no tratamento T2 (fonte convencional e dose de 200 kg/ha) em 100 kg de solo	36
Figura 7. Sacos plásticos acondicionados em bancadas para o período de incubação do solo com fontes de Si	37
Figura 8. Disposição final dos vasos de a) 11 dm ⁻³ e b) 1 dm ⁻³ nas bancadas	38
Figura 9. Plantas de feijoeiro-comum aos 53 dias após a emergência entre os estádios de pleno florescimento e formação das vagens	39
Figura 10. Determinação do diâmetro do caule na altura do colo da planta	40
Figura 11. Leitura do ICF nos 3 trifólios de uma folha composta por planta	41
Figura 12. Medição do comprimento da haste principal	41
Figura 13. Índice de Clorofila Falker total (ICFt) em função das doses de Si adicionadas pelo Agrosilício Plus®	46
Figura 14. Índice de Clorofila Falker total (ICFt) em função de doses de Si adicionadas pelo pó de rocha silicatada	48
Figura 15. Isotermas de adsorção de P pelo modelo de Langmuir sob variações de fontes e doses de Si	51-52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Adubação mineral de semeadura para o feijoeiro-comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) no Estado de São Paulo	16
Tabela 2. Adubação mineral de cobertura para o feijoeiro-comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) no Estado de São Paulo	17
Tabela 3. Resultados de análise química para fins de fertilidade de um Latossolo Vermelho Distrófico, coletado na quadra 3 da UFSCar – Araras (SP) na profundidade de 0 a 20 cm	35
Tabela 4. Médias e análise de variância (ANOVA) dos parâmetros biométricos do feijoeiro-comum cultivar BRS Estilo cultivado em Latossolo Vermelho Distrófico com diferentes fontes e doses de Si	44
Tabela 5. Médias dos Índices de Clorofila Falker total (ICFt) para o feijoeiro-comum cultivado em Latossolo Vermelho Distrófico em função de fontes e doses de Si	48
Tabela 6. Parâmetros de capacidade de adsorção máxima ($Ads_{m\acute{a}x}$) e coeficiente de afinidade (K_L) obtidos pelo ajuste do modelo de Langmuir aos resultados de adsorção de P em Latossolo Vermelho Distrófico com variação de fontes e doses de Si	54
Tabela 7. Análise de variância (ANOVA) a $p < 0,05$ para o parâmetro de $Ads_{m\acute{a}x}$ ($mg\ kg^{-1}$) de P em função de fontes e doses de Si	55
Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) a $p < 0,05$ para o parâmetro de K_L ($L\ kg^{-1}$) em função de fontes e doses de Si	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1. O feijoeiro-comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	14
2.1.1. Aspectos econômicos	14
2.2. Recomendação de calagem e adubação	15
2.2.1. O fósforo (P) nas plantas	18
2.3. Eficiência da adubação fosfatada	19
2.4. Limitações de fósforo (P) em solos altamente intemperizados	21
2.5. Formas de fósforo (P) no solo	23
2.6. Mecanismos de adsorção do fósforo (P) no solo	25
2.6.1. Isotermas de adsorção	26
2.7. Estratégias de redução da adsorção de fósforo (P)	28
2.7.1. O silício (Si) no solo e a interação com o fósforo (P)	28
2.7.2. Fontes comerciais e alternativas de silício (Si) para a agricultura	29
3. OBJETIVOS	32
4. MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1. Caracterização do ambiente	33
4.2. Delineamento experimental	33
4.3. Cultivar escolhida	34
4.4. Fontes de silício (Si)	34
4.5. Solo	34
4.6. Incubação do solo com as fontes de silício (Si)	35
4.7. Preenchimento dos vasos e adubação de plantio	37
4.8. Inoculação e semeadura	38
4.9. Adubação de cobertura	38
4.10. Tratos culturais	39
4.11. Avaliações biométricas	39
4.12. Experimento de adsorção tipo “batch” e isotermas de Langmuir	42
4.13. Forma de análise dos resultados	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1. Parâmetros biométricos	44
5.2. Isotermas de adsorção de fósforo (P)	50
5.3. Influência do tempo de incubação e granulometria das fontes de silício (Si)	56
6. CONCLUSÃO.....	58
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

Os solos ácidos e altamente intemperizados das regiões tropicais e subtropicais, a exemplo da Ordem dos Latossolos (SANTOS et al., 2018), apresentam baixa fertilidade natural (PAVINATO, 2007) e caráter oxídico devido a expressiva presença de oxi-hidróxidos de ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês (Mn), além de filossilicatos do tipo 1:1 (ARAÚJO, 2000). A depleção de quantidades significativas de fósforo (P) disponível às plantas é explicada por fenômenos de fixação ou adsorção específica deste nutriente na superfície dos coloides do solo por meio de reações de alta energia, ou quimiossorção, que imobilizam os íons fosfato em frações não prontamente disponíveis (RAIJ, 1991; SOARES e CASAGRANDE, 2009).

O mecanismo de adsorção de P aos coloides impacta negativamente na eficiência da adubação fosfatada no Brasil, que consome mais de 5.000 mil t de P_2O_5 (NPCT, 2017). Cerca de 75% a 95% do P aplicado na forma de fertilizantes solúveis é fixado (FALCÃO e SILVA, 2004; CARVALHO, 2014) devido ao comportamento de dreno do solo em virtude das baixas concentrações de P em solução, impactando diretamente na absorção deste nutriente pelas plantas (NOVAIS et al., 2007) e nas altas doses aplicadas todos os anos.

A baixa disponibilidade de P é uma das principais limitações nutricionais para o crescimento de plantas em agroecossistemas (RAIJ, 2011), incluindo a cultura do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) (ZUCARELI et al., 2011). O P exerce papel fundamental no armazenamento de energia na forma de moléculas de adenosina trifosfato (ATP), essencial para os processos de respiração celular e fotossíntese, na fixação biológica de nitrogênio (N) e na síntese e acúmulo de proteínas nos grãos do feijoeiro (MALAVOLTA, 2006). Para o Estado de São Paulo, o fornecimento de P à cultura do feijoeiro-comum pode atingir valores de 90 kg/ha de P_2O_5 (RAIJ et al, 1997), enquanto para outras regiões, como o Cerrado, a adubação fosfatada de plantio é estimada em até 120 kg/ha de P_2O_5 (SOUSA e LOBATO, 2004).

Diversas são as estratégias para a minimização da problemática da fixação de P em solos altamente intemperizados com vistas à disponibilização deste nutriente para as plantas, como a aplicação de íons competidores pelos sítios de adsorção do fosfato (CARVALHO et al., 2001; BOCHARNIKOVA e MATICHENKOV, 2001; ALOVISI et al., 2014; TORRES et al, 2020). O silício (Si) é um elemento benéfico às plantas e está presente na solução do solo como ácido monossilícico. Ao ser adsorvido no complexo de troca dos coloides do solo, o íon silicato pode aumentar a disponibilização de fosfato, uma vez que ambos competem pelos mesmos sítios de adsorção devido à similaridade de suas espécies iônicas, promovendo a dessorção de P e o aumento dos seus teores na solução do solo (MALAVOLTA, 2006).

Alguns produtos contendo Si quando aplicados ao solo podem retardar ou diminuir a fixação de P aos coloides, a exemplo dos remineralizadores (MAPA, 2016) que passam pelo processo de moagem do material mineral, visando o fornecimento de nutrientes às plantas ou melhorias das condições do solo (PÁDUA, 2012). Os íons silicato produzidos a partir da solubilização dessas fontes alternativas têm o potencial de dessorver o P fixado aos coloides por ligações covalentes de alta energia, disponibilizando-o na solução do solo e permitindo a absorção pelas plantas (CASTRO et al., 2016; TOSCANI e CAMPOS, 2017).

A utilização de subprodutos da mineração, como os pós de rochas silicatadas, na prática de rochagem pode contribuir para o aumento da eficiência da adubação fosfatada de plantio, com efeitos acumulativos de disponibilização de P ao longo dos ciclos de cultivo, além de proporcionar uma melhor destinação desses materiais que, se descartados incorretamente, causam prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.)

Segundo a classificação de Cronquist (1988), o gênero *Phaseolus* sp. pertence à subclasse Rosidae, ordem Fabales e família Fabaceae (SILVA e COSTA, 2003), sendo o local de origem descentralizado, mas voltado às regiões da América. Segundo Freitas (2006), o território que se estende desde o Norte do México até o Norte da Argentina abriga populações selvagens de feijoeiro. Essa extensa área de ocorrência possibilitou o surgimento de raças locais, que passaram por seguidos eventos de domesticação que resultaram nas variedades existentes atualmente. Isto ocasionou a especulação de dois principais centros primários de origem nas Américas, um deles na América do Norte e Central (desde sudeste dos Estados Unidos até o Panamá) e, outro na região Sul dos Andes, concentrando os territórios ao Sul do Peru, Bolívia e Norte da Argentina. Além disso, há a possibilidade da existência de um terceiro centro na Colômbia. No entanto, a limitação do surgimento de espécies de feijão no continente americano ainda reúne alguns debates e controvérsias (FREITAS, 2006), uma vez que Ásia, Europa e África podem ser apontados como centros secundários de algumas espécies consumidas atualmente (MACEDO et al., 2002).

Desde sua origem até a extensa disseminação ao redor do mundo, o feijoeiro-comum garantiu a segurança alimentar de bilhões de pessoas, especialmente aquelas em situações de vulnerabilidade, caracterizando-se como um dos alimentos mais consumidos no mundo. Estima-se que em 2007, o maior consumo de feijão se concentrava nas Américas, Ásia e África, e em menores taxas na Europa e Oceania, demonstrando que a cultura é mais presente nos países em desenvolvimento, situados em regiões tropicais e subtropicais, que eram responsáveis por 87,1% do consumo e 89,8% da produção (GONZAGA e BARBOSA, 2012).

2.1.1. Aspectos econômicos

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), uma cultura de lavoura temporária, possui três safras ao longo de um ano agrícola (SILVA e WANDER, 2013). Considerando as características da cultura, os diferentes meios de cultivo, que variam de acordo com as regiões, e a variabilidade climática no Brasil, pode-se dizer que sempre haverá produção em alguma localidade do país. Isto se torna essencial para manter o abastecimento interno e reduzir a oscilação de preços. Embora tenha potencial de produção em todos os Estados brasileiros, a feijocultura encontra-se mais expressivamente estabelecida no Paraná, em Minas Gerais, na

Bahia, em São Paulo e em Goiás, sendo conduzida em sua grande maioria por pequenos produtores (GONZAGA e BARBOSA, 2012).

Baseando-se no período de plantio, tem-se: a 1ª safra ou “das águas” (semeadura de agosto a novembro e colheita de novembro a março), proeminente nas regiões Sul, Sudeste, Centro-oeste, Nordeste (Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte) e Norte (Tocantins e Rondônia); a 2ª safra ou “da seca” (semeadura de dezembro a abril e colheita de abril a julho), ocorre nas regiões Sul, Sudeste, Centro-oeste e Norte; e a 3ª safra ou “de inverno” (semeadura de abril a julho e colheita de agosto a outubro), comumente irrigada, é plantada principalmente no Centro-sul. As diferentes safras garantem a sazonalidade de produção no tempo e espaço, visto que grande parte é direcionada para o abastecimento interno (SILVA e WANDER, 2013).

O panorama geral de oscilações de safras de feijão, considerando as cultivares de cor e preto (feijoeiro-comum) e caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp), segundo dados do 12º levantamento (setembro de 2022) organizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), mostra que a área plantada, produtividade e produção na safra de 2021/2022, em comparação a safra 2020/2021, foram de 2.854,2 mil ha (2,4% menor), 1.050 kg/ha (6,1% maior) e 2.997,0 mil t de grãos (3,6% maior), respectivamente. Além disso, somando-se o estoque inicial de 109,1 mil t, a produção total de 2.997,0 mil t e as importações de 100,0 mil t, o suprimento interno foi igual a 3.206,1 mil t de grão com uma demanda de 3.000 mil t (2.850 mil t de consumo interno e 150 mil t exportadas).

Em comparação com a safra 21/2022, a área plantada, a produtividade e produção foram estimadas em 2.819,2 mil ha (1,2% menor), 1.051 kg/ha (0,4% maior) e 2.962,1 mil t (0,9% menor), respectivamente, pelo 1º levantamento (feito em outubro) da safra de grãos 2022/2023. Além disso, o suprimento interno teve um crescimento para 3.259,4 mil t e a demanda se manteve em 3.000 mil t de grãos (CONAB, 2022).

2.2. Recomendação de calagem e adubação

Considerando o cenário em escala nacional, visto que a produção do feijoeiro ocorre nas cinco regiões do país, torna-se fundamental observar alguns critérios para a adubação desta cultura, como a fertilidade do solo, que varia de acordo com a sua classificação e manejo, e as necessidades do feijoeiro comum, que nortearão a recomendação de adubação com base na disponibilidade de nutrientes do solo e as exigências nutricionais da cultura (SILVA e PELOSO, 2006).

Com base na análise de solo, as recomendações de calagem para o feijoeiro no Estado de São Paulo objetivam elevar a saturação por bases (V%) a 70% e o teor mínimo de

Mg a $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Além disso, indica-se a rotação de culturas e adubação verde como estratégias para a adubação orgânica, a fim de incorporar material vegetal ao solo, ou ainda, a aplicação de esterco ou compostos orgânicos, enquanto a adubação mineral de semeadura deve seguir as orientações de RAIJ et al. (1997), após a definição da produtividade esperada (Tabela 1).

Tabela 1. Adubação mineral de semeadura para o feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) no Estado de São Paulo.

Produtividade esperada t/ha	N kg/ha	P resina, mg dm^{-3}				K trocável, $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$			
		0-6	7-15	16-40	>40	0-0,7	0,8-1,5	1,6-3,0	>3,0
		P ₂ O ₅ , kg/ha				K ₂ O, kg/ha			
Feijão de verão (águas e seca)									
Plantio em julho-outubro e dezembro-abril									
1,0-1,5	0	60	40	20	0	40	30	20	0
1,5-2,5	10	70	50	30	10	50	30	20	10
2,5-3,0	10	90	60	30	20	60	40	30	20
Feijão de inverno irrigado									
Plantio em março-julho									
1,0-1,5	0	60	40	20	0	40	20	0	0
1,5-2,5	10	70	50	30	10	50	30	20	0
2,5-3,5	10	90	60	40	20	80	50	30	20
3,5-4,5	20	(¹)	80	40	20	100	60	40	20

(¹) É pouco provável a obtenção de alta produção em solos deficientes em P.

Fonte: RAIJ et al. (1997).

Recomenda-se a aplicação de: 20 kg/ha de enxofre (S) para expectativas de produtividade de até 2 t/ha de grãos ou 30 kg/ha para maiores estimativas; 3 kg/ha de zinco (Zn) se o teor de Zn-DTPA no solo for inferior a $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$; 1 kg/ha de boro (B) quando o teor de B em água quente for menor que $0,21 \text{ mg dm}^{-3}$. Além disso, deve-se fazer o tratamento das sementes com o inoculante específico para a cultura (RAIJ et al., 1997).

A adubação mineral de cobertura (Tabela 2) considera a produtividade esperada em t/ha e a classe de resposta do solo ao N (baixa, média ou alta), definida a partir do histórico da área. O parcelamento de K₂O pode ocorrer se a sua dose em semeadura for superior a 50 kg/ha, devendo ser aplicada em cobertura em um período que não exceda 25 dias após a emergência das plântulas (RAIJ et al., 1997).

Tabela 2. Adubação mineral de cobertura para o feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) no Estado de São Paulo.

Produtividade esperada t/ha	Classe de resposta a N	
	Alta	Média e baixa
	----- N, kg/ha -----	
1,0-1,5	40	20
1,5-2,5	50	30
2,5-3,5	70	40
3,5-4,5	90	50

Fonte: RAIJ et al. (1997).

Considerando a adubação de semeadura e os teores de nutrientes no solo verificados pela análise laboratorial, o P é o que apresenta a maior dose dentre os três macronutrientes primários, podendo chegar a 90 kg/ha de P₂O₅ para o Estado de São Paulo a partir de um teor entre 0-6 mg dm⁻³ de P extraído por resina trocadora de íons (RAIJ et al., 1997). No Estado de Minas Gerais, as doses podem chegar a 110 kg/ha de P₂O₅ para áreas com baixo teor de P no solo e produtividades acima de 2,5 t/ha (SILVA e PELOSO, 2006; GONZAGA e BARBOSA, 2012).

A adubação fosfatada na região do Cerrado considera o teor de argila e a disponibilidade do P no solo, sendo dividida em: adubação corretiva, na qual as doses podem alcançar 420 kg/ha de P₂O₅ em sistemas irrigados (teor de P entre 0 e 3 mg dm⁻³ e de argila > 60%); adubação corretiva gradual em 5 anos, quando as doses de P são elevadas assim como o custo com os fertilizantes, com até 120 kg/ha de P₂O₅ aplicados em sistemas de sequeiro; adubação de manutenção, na qual os teores de P são adequados (entre 4,1 e 6 mg dm⁻³) ou altos (> 6 mg dm⁻³), com doses entre 80 e 120 kg/ha de P₂O₅ para sistemas irrigados e disponibilidade adequada de P (SOUSA e LOBATO, 2004).

Para o Estado do Rio de Janeiro e considerando os teores de P no solo entre o intervalo de 0 a 10 mg dm⁻³, a dose máxima de P₂O₅ atinge os 90 kg/ha (FREIRE et al., 2013), enquanto para os Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul e conforme a disponibilidade muito baixa de P no solo (≤ 2 e 5 mg dm⁻³ para os extratores Mehlich-1 e resina trocadora de íons, respectivamente), a dose de P₂O₅ pode alcançar 105 kg/ha (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2004). No Estado do Paraná, as estimativas de produtividade de 2-3

t/ha para teores muito baixos, de 3,1-4 t/ha para teores baixos e maiores que 4 t/ha para teores médios, visam a aplicação de 101 a 120 kg/ha de P_2O_5 , baseando-se também no teor de argila do solo (MOTTA e PAULETTI, 2019). Na região Nordeste, em casos de baixa disponibilidade de P no solo (valores $< 5 \text{ mg dm}^{-3}$), as doses podem alcançar entre 80 e 100 kg/ha de P_2O_5 (MANOS et al., 2013).

As elevadas doses de P podem ser explicadas devido a este nutriente ter uma maior influência na produção do feijoeiro, especificamente nos solos brasileiros altamente intemperizados como os Latossolos, que proporcionam altas taxas de adsorção aos colóides do solo (oxi-hidróxidos de Fe e de Al e filossilicatos 1:1) acarretando a retenção de formas inorgânicas de P à fração mineral a partir de relações de alta energia. Este fenômeno contribui para a baixa disponibilidade deste nutriente na solução do solo e limitação da produção do feijoeiro (SANTOS et al., 2011; ALOVISI et al., 2014).

2.2.1. O fósforo (P) nas plantas

Apesar de o P ser um dos macronutrientes menos extraído e exportado pelo feijoeiro-comum (VIEIRA, 2006), sendo exigido em quantidades dez vezes menores que a demanda de N, a disponibilidade deste nutriente se caracteriza como um dos principais fatores limitantes à altas produtividades em solos brasileiros (ZUCARELLI et al., 2011). O P está presente nas plantas e no solo na forma de fosfatos, sendo eles inorgânicos, ésteres simples (incluindo ATP e ADP, fosfato de inositol presente em sementes e tubérculos, e fosfato de riboflavina ou vitamina B2), fosfolipídeos (componentes das membranas celulares, com expressiva representatividade nos cloroplastos), ácido desoxiribonucleico (DNA) e ribonucleico (RNA) (MALAVOLTA, 2006; BRADY e WEIL, 2013).

Diversas e imprescindíveis são as funções do P em relação aos componentes de produção, como: regulação da absorção de nutrientes através da membrana plasmática; armazenamento de energia na forma de ATP nos processos de fotossíntese e respiração; síntese de proteínas e participação nos processos de fixação biológica de N; influência no genótipo das plantas a partir da transferência de material genético; formação e desenvolvimento do sistema radicular; melhoria do pegamento de flores e consequente frutificação; promoção do aumento no teor de açúcares na planta (MALAVOLTA, 2006); influência no vigor e viabilidade de sementes (ZUCARELLI et al., 2011), entre outras.

No feijoeiro-comum, os sintomas de deficiência de P se expressam nos tecidos mais velhos da planta, como os folíolos com colorações verde-claras e, em alguns casos, áreas cloróticas internervais com pontuações escuras. Nos folíolos novos, uma coloração verde-

azulada pode ser observada. O crescimento da planta é reduzido com hastes principais encurtadas e esguias (ROSOLEM e MARUBAYASHI, 1994), além da menor concentração de P nos grãos com impacto direto no vigor das sementes (MALAVOLTA, 2006).

Em experimento conduzido por Vieira (2006), observou-se que o pico de absorção de P está entre o intervalo dos 30 aos 55 dias após a emergência (DAE), referente aos estádios fenológicos de pré-floração com aparecimento dos botões florais (R5) até o final do florescimento (R6), tornando-se mais proeminente entre os 45 e 55 dias, período que compreende a formação das vagens (R7). As marchas de absorção dos macronutrientes N, P e K pelo feijoeiro-comum, cultivares Ouro Negro e Talismã, respectivamente, em sistema de plantio convencional são mostradas na Figura 1. A absorção constante de P é uma das justificativas para o fornecimento contínuo deste nutriente às plantas com o uso, por exemplo, de fontes menos solúveis de P no momento da sementeira.

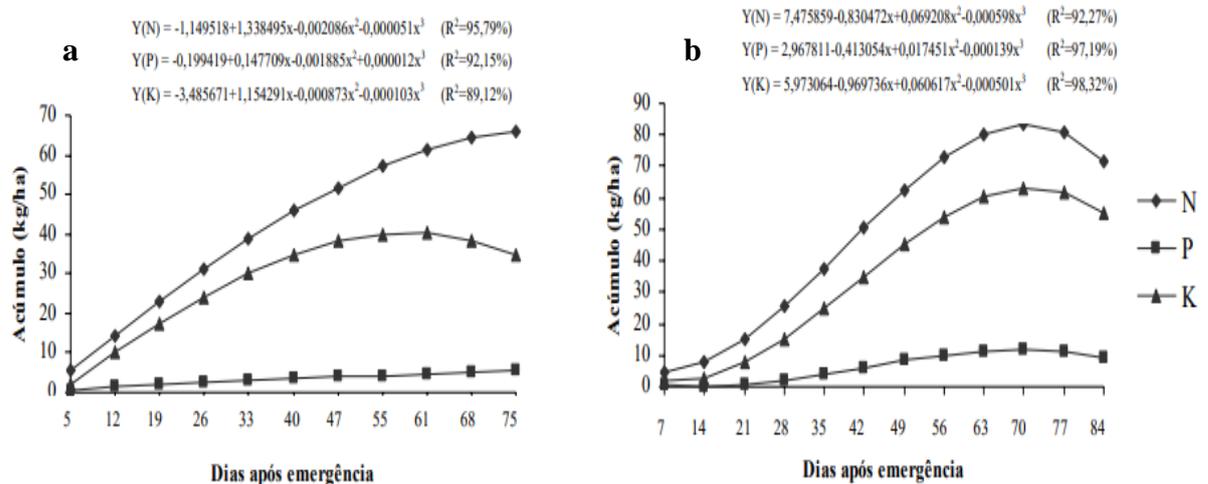


Figura 1. Marchas de absorção de macronutrientes primários pelo feijoeiro-comum, cultivares a) Ouro Negro e b) Talismã, em sistema de plantio convencional na cidade de Lavras (MG).

Fonte: VIEIRA (2006).

2.3. Eficiência da adubação fosfatada

O baixo teor de P disponível nos solos altamente intemperizados está entre as diversas limitações nutricionais ao crescimento das plantas em ambientes tropicais (ARAÚJO, 2000; SOUSA e LOBATO, 2003; FALCÃO e SILVA, 2004; SOUZA et al., 2006; NOVAIS et al., 2007; RAIJ, 2011). Os solos intemperizados de regiões tropicais úmidas merecem uma atenção especial durante o processo de adubação das culturas cultivadas, uma vez que a adubação fosfatada impacta no processo produtivo pelo seu elevado custo de produção e sua

baixa eficiência (CESSA et al., 2011), por conta da regulação da disponibilidade de P pelo mecanismo de sorção deste nutriente aos coloides (SANTOS et al., 2011).

A intensidade da adsorção do P pelas frações minerais em solos altamente intemperizados pode alcançar 90% do P inorgânico após 192 horas da aplicação (CARVALHO, 2014). A baixa disponibilidade deste elemento pode afetar a sua distribuição nos compartimentos das plantas, impactando diretamente nos teores de P inorgânico acumulado nos vacúolos e P orgânico citoplasmático, imprescindíveis ao crescimento e desenvolvimento vegetal (CARVALHO et al., 2001).

O solo é naturalmente uma fonte de nutrientes quando apresenta características de reserva às plantas. No entanto, com o avanço do intemperismo ocorrem mudanças nas características de um solo que pode passar do estado de fonte para dreno de P (NOVAIS et al., 2007). Nesta situação, haverá competição entre a planta-dreno e o solo pelo P adicionado através do fertilizante. Em alguns casos, esse fenômeno é maior no dreno-solo (adsorção) em comparação ao dreno-planta (absorção), em virtude de a concentração de P na solução do solo ser baixa. O fosfato tenderá a ser adsorvido aos coloides, devido ao elevado poder tampão dos solos intemperizados (ARAÚJO, 2000), estando em níveis insatisfatórios para a absorção vegetal (NOVAIS et al., 2007). Estima-se que cerca de 10% a 20% do nutriente são efetivamente utilizados pelas culturas, e menos de 50% tende a permanecer como P residual adsorvido aos coloides (BOLLAND e GLIKES, 1998 apud SANTOS et al., 2011). Em um cenário mais pessimista, cerca de 5% a 25% do fósforo solúvel adicionado com a adubação é aproveitado pelas plantas com uma faixa de 75% a 95% sendo fixado (ALCARDE et al., 1991 apud FALCÃO e SILVA, 2004).

De maneira geral, a aplicação de fertilizantes fosfatados químicos ou naturais no solo objetiva manter os teores adequados para que a eficiência da adubação fosfatada, e a consequente absorção pelas plantas, possa ser garantida (YAN et al., 2017), haja visto que esse valor para os solos brasileiros se encontra abaixo de 50% (PAVINATO, 2019 apud GLOBALFERT, 2019), assim como demonstrado para o feijoeiro por Pavinato et al. (2020) (Figura 2).

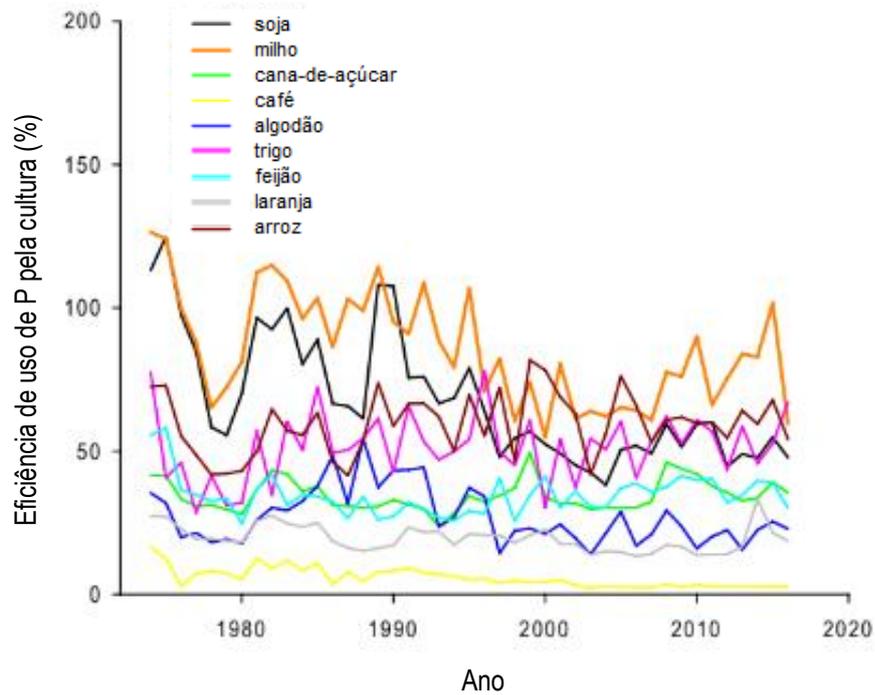


Figura 2. Eficiência do uso de P (%) por diferentes culturas entre os anos de 1960 e 2016.

Fonte: PAVINATO et al. (2020).

Segundo dados da GlobalFert (2022), o Brasil depende de importações de fertilizantes fosfatados para manter o suprimento interno, que são originárias, principalmente, de países como o Marrocos (28,5%), China (17,7%), Rússia (17,6%) e Egito (14,2%), sendo o fosfato monoamônico (MAP), o fosfato diamônico (DAP), o superfosfato triplo (TSP) e o superfosfato simples (SSP) as fontes mais utilizadas. Em 2021, os volumes importados dessas fontes foram de 5,2 (milhões t), 458,77 (mil t), 1,4 (milhões t) e 2 (milhões t), com acréscimos de 8,3%, 12,2%, 75,4% e 97,2% em relação a 2020, respectivamente.

2.4. Limitações de fósforo (P) em solos altamente intemperizados

A fixação de P em solos tropicais como um fator limitante da eficácia dos fertilizantes fosfatados contribui para baixos teores do nutriente na solução do solo prontamente disponível às plantas. Elevados teores de “legado” de P (ou “*legacy*” P), ou seja, reservas de P residual acumuladas ao longo dos anos de cultivo a partir de adubações, foram observados nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, norte do Paraná, Espírito Santo e Goiás com acúmulo acima de 500 kg/ha de P (Figura 3), considerando que mais de 70% do P adicionado via fertilizantes permanece no solo em formas não prontamente disponíveis às plantas (PAVINATO et al., 2020).

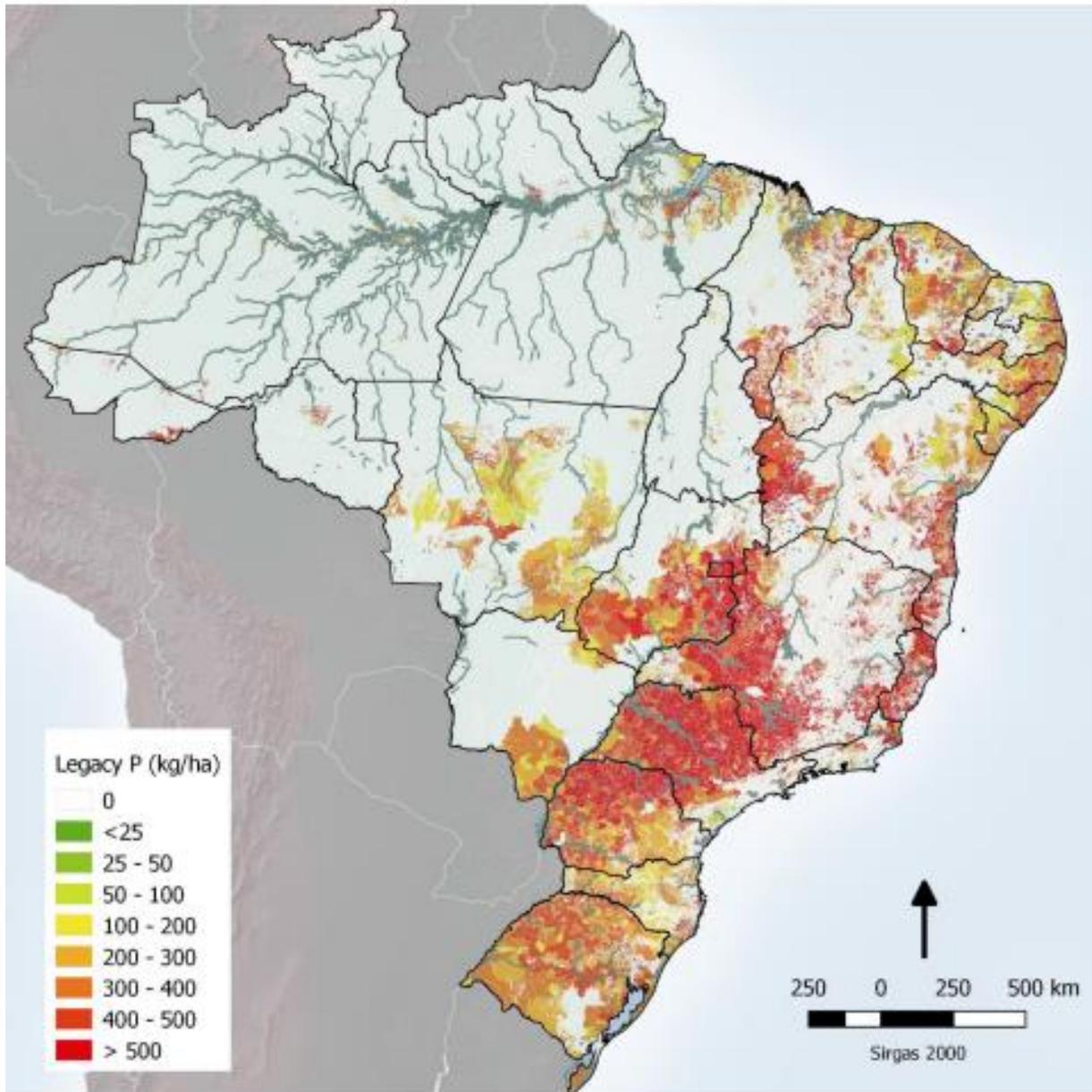


Figura 3. Mapa do “legado” de P acumulado durante o cultivo e adição de fertilizantes minerais fosfatados em áreas agrícolas brasileiras durante o período de 1960 a 2016.

Fonte: PAVINATO et al. (2020).

Alguns Latossolos do Cerrado conseguem adsorver cerca de 2 mg dm^{-3} de P, o equivalente a 4.000 kg/ha de P ou 9.200 kg/ha de P_2O_5 em formas não-lábeis (NOVAIS et al., 2007). Estima-se que as concentrações de P na solução do solo podem variar de $0,01$ a 1 mg/L [na forma de ácido ortofosfórico (H_2PO_4^-) a pH acima de $6,0$], enquanto os teores de P orgânico total estão na faixa de 7 a 272 mg/kg em solos brasileiros (ARAÚJO et al., 2000). Malavolta (2006) estimou que as quantidades totais de P na profundidade de 0 a 20 cm de solos brasileiros variaram entre $0,005$ e $0,2\%$, o que equivale a uma faixa de 110 a 4.400 kg/ha .

Os primeiros trabalhos relacionados ao estabelecimento da relação entre concentração de P na solução do solo e o crescimento de plantas propuseram 0,2 mg/L de P como o teor necessário (NOVAIS et al., 2007). Apesar de o teor total de P no solo ser relativamente alto, na faixa de 200 a 3.000 mg/kg, em grande parte dos casos, menos de 0,1 % se encontra em formas lábeis à absorção pelas plantas, o que equivale a 0,2 a 3 mg dm⁻³. Teores equivalentes a 2,0, 2,3 e 1,4 mg dm⁻³ foram observados em Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média, Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura argilosa e Latossolo Vermelho Distrófico de textura muito argilosa, respectivamente, nos municípios de Itumirim e Lavras, Minas Gerais (SOUZA et al., 2006; NOVAIS et al., 2007). Toledo et al. (2011) encontraram um teor de P igual a 3 mg dm⁻³ em um LATOSSOLO de textura média na região de Botucatu (SP), enquanto Sousa e Lobato (2003) apresentaram valores de P em solução na faixa de 1 a 3 mg dm⁻³ para um Latossolo Vermelho de textura muito argilosa (65% de argila) e um Latossolo Vermelho de textura argilosa (35% de argila), ambos da região do Cerrado.

Ao realizarem um experimento na região de Botucatu (SP) sobre Latossolo Vermelho Distrófico, Corrêa et al. (2004) encontraram um teor de P igual 4,3 mg dm⁻³, superior ao habitual visto na literatura. Isto se deve, principalmente, a textura do solo em estudo, classificada como franco arenosa com um teor de argila em torno de 16%, que contribuiu para uma menor fixação de P. Na mesma região de estudo, Sandim et al. (2014) encontraram um teor de P igual a 4 mg dm⁻³, em um Latossolo Vermelho Distrófico de textura média e, a 5 mg dm⁻³, em um Latossolo Vermelho Distroférico de textura argilosa.

2.5. Formas de fósforo (P) no solo

Para compreender as formas de P no sistema solo-planta, a Figura 4 sumariza as interrelações existentes entre os compartimentos de P no solo e as reações que podem alterar (aumentar ou diminuir) os seus teores, impactando diretamente no processo de absorção pelas plantas (NOVAIS et al., 2007).

O transporte de P em direção às raízes das plantas se dá através do mecanismo de difusão (MALAVOLTA, 2006), ou seja, a absorção vegetal de íons fosfato cria uma zona de déficit (ou zona de depleção) em torno da raiz. Com isso, os íons se difundem por uma diferença de potencial químico até a superfície radicular (ARAÚJO, 2000). A difusão é o que permeia as reações de influxo (absorção) ou efluxo (perda) entre a planta e a solução do solo, esta última em situações nas quais os teores de P na planta são elevados. Além disso, o P presente em estruturas vegetais pode atuar como fonte orgânica do nutriente e, em alguns casos como o de florestas tropicais sobre solos-dreno de P, as plantas podem absorver o nutriente diretamente

do “*litter*” evitando o contato do substrato orgânico com a fase mineral e reduzindo a fixação de P (NOVAIS et al., 2007).

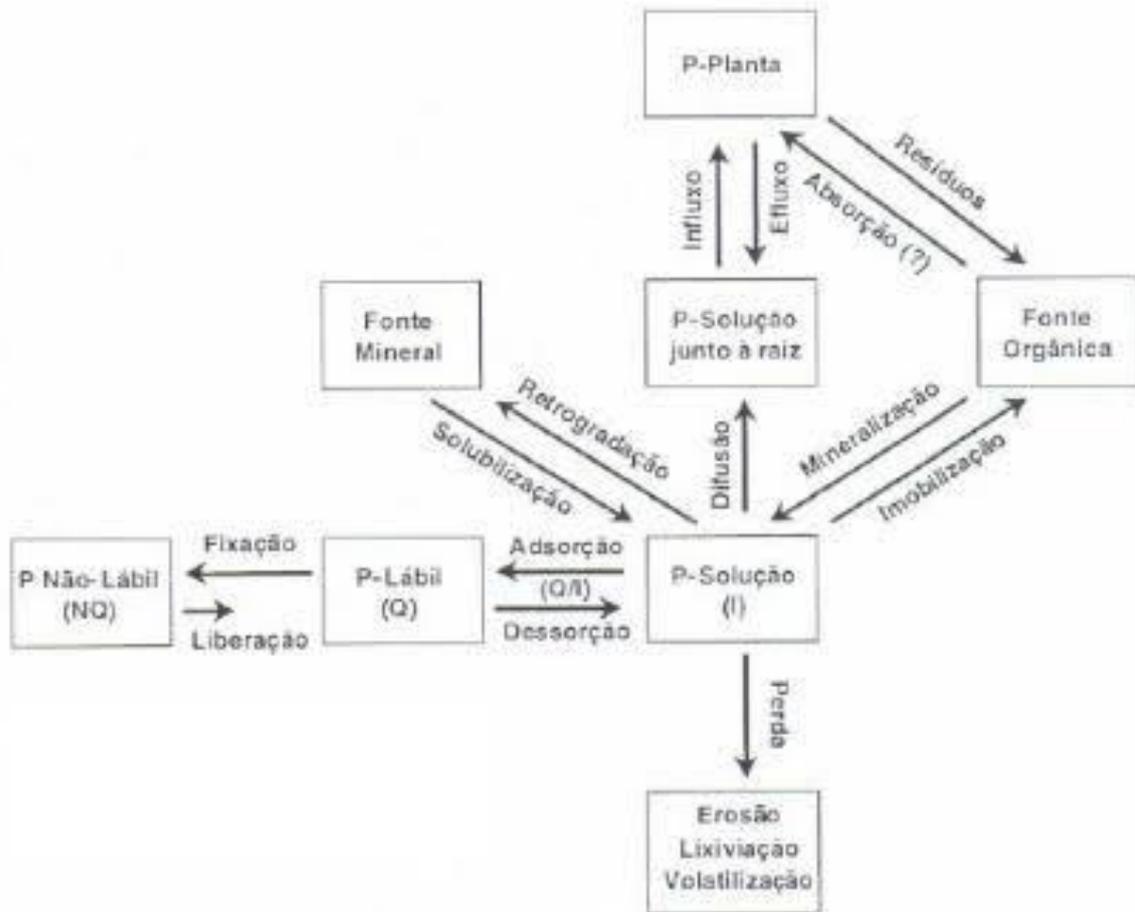


Figura 4. Formas de P na interação solo-planta.

Fonte: NOVAIS et al. (2007).

Fontes minerais e orgânicas possuem o caráter repositório de nutrientes ao solo. Os fertilizantes comumente aplicados na agricultura são fabricados a partir de diferentes fontes com solubilidades variadas que permitem a compensação de P na solução do solo em taxas diversas. No entanto, dependendo do pH do solo, a retrogradação (Figura 4) é um fenômeno que pode ocorrer quando compostos de baixa reatividade são formados a partir da migração do P-solução para o P-fase mineral. No caso da matéria orgânica, o caráter fonte é evidenciado no processo de mineralização da biomassa que eleva os teores de P em solução, ao passo que o comportamento de dreno se expressa quando há incorporação de P pela microbiota do solo no caso de fornecimento de um resíduo com elevado carbono e uma alta relação C/P (NOVAIS et al., 2007).

O consumo de P da solução do solo através da absorção, retrogradação, imobilização e perdas diminui a concentração do elemento neste compartimento, sendo este recomposto pelo P-lábil, que atua como um estoque para recuperar o equilíbrio do sistema, com as formas de P precipitadas com Al, Fe e cálcio (Ca) ou adsorvidas a óxidos de Fe e Al da fração argila, sendo esta última a forma mais expressiva em solos com texturas argilosas em comparação a texturas médias e arenosas. Há, ainda, o processo de fixação do P-lábil em P-não-lábil, fração inorgânica de P adsorvido ao solo ou em compostos de baixa solubilidade (RAIJ, 1991; SOUZA et al., 2007), mais evidente em solos tropicais intemperizados nos quais a passagem para a forma não-lábil é rápida (CARVALHO, 2014) contribuindo para os baixos teores de P em solução a partir da fixação de grande parte do que é adicionado ao solo em formas solúveis (NOVAIS et al., 2007).

2.6. Mecanismos de adsorção do fósforo (P) no solo

A adsorção, de forma geral, refere-se ao acúmulo de um elemento ou substância na região limítrofe entre a fase sólida e a líquida do solo, sendo responsável pela retenção de íons ou moléculas de elementos essenciais às plantas, contaminantes e compostos orgânicos, atuando diretamente no controle da concentração de solutos na solução do solo (SOARES e CASAGRANDE, 2009). Este termo abrange fenômenos relacionados a formação de complexos com os sítios de superfície, no qual o adsorvato é a espécie química que se acumula na interface, o adsorvente é a superfície sólida sobre a qual o adsorvato se acumula e o adsorvido é o íon ou molécula em solução com o potencial para ser adsorvido (NOVAIS et al., 2007; SOARES e CASAGRANDE, 2009).

Em um primeiro momento, há a transferência de íons ou moléculas entre as fases líquida e sólida do solo através da atração eletrostática entre cargas positivas e negativas existentes nas superfícies de partículas minerais ou orgânicas. Em seguida, a partir da formação de uma unidade molecular imobilizada entre o adsorvato e o grupo funcional, pode-se definir a força da interação como sendo menos intensa, eletrostática, por exemplo, ou como interações de alta energia, como as ligações covalentes. No caso do fosfato, a adsorção com os colóides do solo é considerada de esfera interna ou específica (SOARES e CASAGRANDE, 2009).

Nos complexos de esfera interna não há moléculas de água entre o grupo funcional da superfície e o íon ou molécula ligado, que perdeu o seu raio de hidratação, ocorrendo simultaneamente ligações covalentes e iônicas. A quimiossorção, como também é conhecida, caracteriza-se por envolver interações de alta energia e pouco reversíveis (SOARES e

CASAGRANDE, 2009), podendo ser chamada de fixação ou retenção, que regem a formação do P não-lábil não mais em equilíbrio com o P-solução (NOVAIS et al., 2007).

Durante a fase inicial da quimiossorção de P ao solo, há uma atração eletrostática primária que antecede a troca de ligantes (OH^- e OH_2^+) entre o fosfato em solução e os oxi-hidróxidos de Fe e Al através de uma reação de alta energia (covalente). Em solos com baixo pH, a adsorção de fosfato tende a ser máxima, pois, nesta condição, os oxi-hidróxidos de Fe e Al e as bordas de argilas silicatadas 1:1, como a caulinita, passam a manifestar cargas positivas (VALLADARES et al., 2003). Com altos valores de pH do solo, as superfícies destes coloides tornam-se carregadas negativamente, o que aumenta a repulsão entre o fosfato e o adsorvente e diminui as taxas de adsorção (NOVAIS et al., 2007).

Segundo Moreira et al. (2006), o caráter caulínico de solos tropicais possui um papel secundário na adsorção de P em comparação aos oxi-hidróxidos de Fe e Al, que, devido a sua elevada superfície específica, possuem um maior número de sítios de adsorção, evidenciando a influência da cristalinidade dos minerais secundários no processo de fixação do P (VALLADARES et al., 2003).

2.6.1. Isotermas de adsorção

O efeito da adsorção sobre a disponibilidade de P no solo pode ser visualizado através de dados quantitativos que relacionam a quantidade adsorvida ao solo a partir de uma quantidade conhecida do nutriente (FALCÃO e SILVA, 2004). Existem diversos métodos que estudam o mecanismo de adsorção de íons no solo. O método *batch* de laboratório, ou batelada, é um procedimento simples, rápido e replicável, com três principais premissas: a) deve haver a reação do solo com um fluido de composição conhecida durante um período de agitação; b) separação da fase sólida e líquida do solo por métodos mecânicos; e c) análise química da fase líquida por meios analíticos (SOARES e CASAGRANDE, 2009).

No método *batch*, quantidades conhecidas de solo e do elemento em estudo são colocadas em contato durante um intervalo de tempo definido sob constante agitação. Após o término, considera-se que o sistema atingiu o equilíbrio e a fase líquida (suspensão) deve ser filtrada ou centrifugada para mensuração do soluto remanescente, subtraindo este valor da quantidade inicial adicionada (SOARES e CASAGRANDE, 2009).

Ao final do experimento pelo método *batch*, é possível obter uma relação gráfica com vários pontos, na mesma proporção do número de quantidades iniciais adicionadas. Os gráficos são mais adequadamente chamados de isotermas de adsorção que relacionam os eixos de concentração do elemento na solução do solo (eixo das abcissas em mg/L ou mmol/L) com

o de quantidades adsorvidas do elemento em estudo (eixo das ordenadas em mg/kg ou mmol/kg) após o sistema atingir o equilíbrio sob condições definidas de temperatura, pressão, pH e força iônica (SOARES e CASAGRANDE, 2009).

No entanto, as isotermas de adsorção precisam ser ajustadas por modelos matemáticos para simular uma situação real. Modelos empíricos ou não-mecanísticos oferecem uma descrição mais simples dos resultados obtidos com base em um menor número de variáveis, oferecendo uma comparação numérica que permite distinguir o comportamento de diferentes elementos e solos (SOARES e CASAGRANDE, 2009).

O modelo de Langmuir, proposto em 1918 por Irving Langmuir (1881-1957) para a descrição da adsorção de gases por superfícies sólidas homogêneas, foi utilizado por Olsen e Watanabe (1957) para descrever o comportamento de adsorção de P pelo solo (FALCÃO e SILVA, 2004). Desde então, tem sido amplamente utilizado na Ciência do Solo devido a sua facilidade de aplicação e ao seu caráter não ser estritamente empírico.

O modelo de Langmuir baseia-se em quatro principais suposições: a) a superfície de adsorção é homogênea, independentemente da cobertura da superfície; b) a adsorção ocorre em sítios específicos sem adsorção lateral; c) a adsorção é máxima quando há a formação de uma camada monomolecular sobre o adsorvente; e d) o adsorvente possui um número finito de sítios de adsorção (SOARES e CASAGRANDE, 2009). De acordo com estas premissas, as isotermas reproduzidas pelo modelo de Langmuir normalmente caracterizam-se por apresentar uma inclinação inicial que não aumenta com a concentração do soluto na solução do solo, devido à alta afinidade da fase sólida do solo pelo soluto em baixos teores na solução, com posterior comportamento assintótico, à medida que a intensidade da adsorção diminui com a ocupação dos sítios de adsorção (SOARES e CASAGRANDE, 2009).

A isoterma de Langmuir é empregada em estudos de adsorção de íons por solos no seguinte formato:

$$[] \text{ ads} = \frac{Ads_{\text{máx}} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que [] ads é a concentração adsorvida (mg/kg); $Ads_{\text{máx}}$ é a capacidade de adsorção máxima após a formação da camada monomolecular do soluto sobre o adsorvente; K_L é o coeficiente de Langmuir relacionado com a afinidade do soluto pelo adsorvente (L/kg); e C_e é a concentração do soluto na solução de equilíbrio (mg/L) (SOARES e CASAGRANDE, 2009).

2.7. Estratégias de redução da adsorção de fósforo (P)

Diante da problemática acerca da baixa disponibilidade de P em grande parte dos solos brasileiros altamente intemperizados, algumas estratégias podem ser utilizadas para aumentar sua disponibilidade no solo e às plantas, tais como: elevação dos teores de matéria orgânica no solo (EGHBALL et al., 1996; AZEVEDO et al., 2004; YANG et al., 2019); utilização de fontes orgânicas de P em conjunto ou isoladamente às fontes inorgânicas (EGHBALL et al., 1996; NZIGUHEBA et al., 1998; CORRÊA et al., 2004); uso de fertilizantes de liberação lenta e controlada ou de produtos com menor solubilidade (MALAVOLTA, 2006; NOVAIS et al., 2007; FRANDOLOSO et al., 2010); práticas que busquem evitar ou minimizar o contato do solo com as fontes de P (FINK et al., 2016); realização da adubação de forma localizada no sulco de plantio; realização da calagem para elevar o pH do solo (SOUSA e LOBATO, 2003; MALAVOLTA, 2006; SOUZA et al., 2006; SOUZA et al., 2007); e utilização de insumos que contenham íons competidores pelos sítios de adsorção do fosfato (CARVALHO et al., 2001; MATICHENKOV e BOCHARNIKOVA, 2001; ALOVISI et al., 2014; TORRES et al., 2020).

2.7.1. O silício (Si) no solo e a interação com o fósforo (P)

O Si é classificado como um elemento benéfico (MALAVOLTA, 2006) devido ao fato de não atender aos critérios de essencialidade propostos por Arnon e Stout (OLIVEIRA, 2009), ou seja, não compõe o grupo dos elementos essenciais às plantas. O Si é o segundo elemento mais abundante na litosfera (BRAIT, 2008), representando 27,7% da crosta terrestre (NOVAIS et al., 2007). Segundo Malavolta (2006), está presente nos solos em quatro possíveis formas: minerais primários como micas, feldspato, muscovita, quartzo, entre outros; minerais secundários formados com a ação do intemperismo como argilas, óxidos e hidróxidos; na solução do solo na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) em valores de pH menores que 7; e adsorvido aos coloides do solo na forma de íons silicato (SiO_2), sendo responsável pela mobilização da reserva de fosfato no solo.

No solo, o Si demonstra uma forte interação com o P com efeito direto na disponibilidade deste nutriente às plantas por conta da dinâmica dos íons silicato e fosfato, uma vez que ambos competem pelos mesmos sítios de adsorção (CESSA et al., 2011). Isto ocorre devido à similaridade iônica do fosfato e silicato que são adsorvidos pelos mesmos sítios na superfície de oxi-hidróxidos de Fe e Al e de argilas de baixa atividade, podendo o silicato dessorver o fosfato e vice-versa, proporcionando aumento nas taxas destes elementos na solução do solo (MALAVOLTA, 2006; MELO et al., 2007; BRAIT, 2008).

A competição entre ânions por sítios de adsorção é um fenômeno que pode retardar a fixação de P pelos coloides (CARVALHO, 2014). Deus e Büll (2013) comprovaram a interação dos íons silicato e fosfato em experimento com cultivo de feijoeiro em Latossolo Vermelho Distrófico, no qual o uso de escória de aciaria proporcionou os maiores teores de P devido aos íons silicato presentes neste subproduto, que competiram pelos sítios de adsorção do P e dificultaram a sua fixação. A interação entre silicato e fosfato também pode ser visualizada no experimento de Melo et al. (2007), através da utilização de wollastonita como fonte de Si e reagentes analíticos como fonte de P, que demonstraram resultados positivos no perfilhamento, número de folhas totalmente expandidas, área foliar, massa de matéria seca de parte aérea e, produção de colmos e bainhas de capim-marandu.

Matichenkov e Bocharnikova (2001) conduziram um experimento para estudo da disponibilização do P através do fornecimento de materiais ricos em Si. Utilizaram substâncias puras, como sílica amorfa, carbonato de Ca e silicato de Ca, e subprodutos industriais, como escórias de aço, além do fosfato de potássio (K) monobásico (KHPO_4) como fonte de P. A maior disponibilização de P foi promovida pelas escórias.

Torres et al. (2020), objetivando avaliar o potencial de fonte alternativa de Si na disponibilização de P ao feijoeiro-comum, observaram um aumento no teor de P em um Latossolo, assim como nos valores de pH, condutividade elétrica, concentração de nutrientes e crescimento das plantas com o uso de *biochar* produzidos a partir de esterco de gado e casca de arroz (1, 2, 3 e 4%), em comparação a um controle sem calagem ou fertilização mineral do solo. Apenas o parâmetro de massa de matéria seca foi significativamente maior no controle, que recebeu calagem e adubação com NPK.

Outro efeito derivado da aplicação de fontes de Si na agricultura é a correção da acidez do solo, como a aplicação de Si antes da fosfatagem corretiva com o objetivo de elevar o pH e os teores de P disponível (BRAIT, 2008). Os produtos mais utilizados na agricultura para o controle da acidez do solo e elevação da disponibilidade de P são aqueles que contêm Ca e magnésio (Mg) (CASTRO et al., 2016), principalmente os carbonatos na forma de calcários agrícolas (calcítico, dolomítico e magnésiano) e, em menor proporção, os silicatos, como na forma de escórias de siderurgia, de alto-forno e básicas ou de Thomas.

2.7.2. Fontes comerciais e alternativas de silício (Si) para a agricultura

As fontes de Si para uso na agricultura devem possuir altas concentrações de Si solúvel em água ou ácidos orgânicos disponível às plantas, propriedades físicas favoráveis a

aplicação mecanizada, quantidades significativas de Ca e Mg e baixas de metais pesados, além de baixo custo de aquisição que justifique o seu transporte e aplicação (SANTOS et al., 2021).

Fontes comerciais para uso direto como fonte de Si na forma de corretivos, fertilizantes ou condicionadores de solo ainda são muito restritas no mercado brasileiro. O termofosfato magnésiano Yoorin® é produzido a partir da fusão de rocha fosfática com serpentina (silicato de magnésio) a 1.500 °C, seguida de resfriamento e moagem. A hidrólise destes silicatos libera hidroxilas que possuem efeito direto na elevação do pH do solo e no controle da toxicidade do Al^{3+} , com formação de compostos estáveis como $Al(OH)_3$ (MALAVOLTA, 2006).). O efeito direto do produto na maior eficiência da adubação fosfatada está associado aos altos teores de P_2O_5 solúveis em ácido cítrico e à presença do Si, cujos teores podem variar de 8 a 10% dentre às opções do fabricante (Yoorin Mg, Yoorin Mg S, Yoorin Master 1, Yoorin Master 1S, Yoorin B Mag). A linha de produtos AgroSilício (2022) da Harsco Corporation contém insumos comercializados como corretivos de acidez, a exemplo do Agrosilício® na forma de silicato de Ca e Mg e, como fertilizantes minerais simples, como o Agrosilício Plus®, o Agrosilício S® e Agrosilício Mg®.

Alguns subprodutos de mineração podem ser utilizados como alternativa para a minimização da adsorção de P pelos solos, em especial rochas silicatadas (CARVALHO, 2012), contribuindo para uma destinação mais adequada destes materiais. A esta técnica atribui-se o nome de rochagem, que consiste na adição do pó de determinadas rochas e minerais objetivando-se alterar a fertilidade do solo a partir do fornecimento de nutrientes e/ou elementos benéficos, como o Si (PÁDUA, 2012). Termos técnicos mais apropriados são usados para os pós de rocha utilizados para a rochagem, tais como agrominerais, petrofertilizantes ou remineralizadores do solo (PÁDUA, 2012). Segundo a Lei nº 6.894 de 1980 alterada pela Lei nº 12.890 de 2013, um remineralizador é *“um material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho de partícula por processos mecânicos e que, aplicado ao solo, altere os seus índices de fertilidade, por meio de adição de macronutrientes e micronutrientes para as plantas, e promova a melhoria de propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica do solo”*. A Instrução Normativa nº 5 de 2016 traz as especificações e garantias dos remineralizadores registrados (MAPA, 2016).

De acordo com Martins et al. (2010), algumas vantagens do uso de fontes alternativas de nutrientes (FAN), como os remineralizadores, comparadas as fontes convencionais (FCN) são: boa distribuição da ocorrência das FAN's em território nacional; efeito residual no médio e longo prazo devido a menor solubilidade de nutrientes diminuindo a aplicação de fontes solúveis; a variada composição elementar e nutricional essencial na

recomposição da fertilidade de solos altamente intemperizados; desenvolvimento de novos minerais da fração argila pela ação do intemperismo que auxiliam no efeito condicionador do solo através da elevada superfície específica e quantidade de cargas; e, o baixo custo de processamento que viabilizaria o desenvolvimento de mineradoras de pequeno porte com menor impacto ambiental.

Atrelado a isso e segundo relatório publicado em 2012 pelo Blacksmith Institute juntamente com a Grenn Cross International, a mineração e a indústria de processamento de minérios ocupam o terceiro lugar de atividades que mais produzem resíduos em países de baixa a média renda no mundo, provocando degradações ambientais em larga escala e contaminação por metais pesados ao ser humano e no ambiente.

O uso efetivo de remineralizadores agrícolas pode ser visualizado no trabalho de Toscani e Campos (2017), que observaram incrementos de área foliar do feijoeiro-comum associado a calagem em conjunto com a aplicação de fosforito e pó de basalto em Latossolo Vermelho Distrófico, com resultados superiores a aplicação de NPK seguido de calagem, durante o período de três ciclos da cultura. Em termos dos componentes de produção, Alves et al. (2021) notaram o maior fornecimento de K e Mg ao solo com conseqüente incremento na massa de mil grãos e produtividade do feijoeiro-comum cultivado em Cambissolo Háplico Eutrófico, na cidade de Verdelândia (MG), com o fornecimento de pó de ardósia em comparação ao pó de rocha calcária.

3. OBJETIVOS

Objetivo geral

Avaliar o efeito da aplicação de fontes e doses de silício (Si) na adsorção de fósforo (P) e no desenvolvimento do feijoeiro-comum, cultivado em Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) sob condições de casa de vegetação.

Objetivos específicos

- Verificar se os parâmetros biométricos normalmente empregados na caracterização do desenvolvimento do feijoeiro-comum são sensíveis às fontes e doses de Si;
- Comparar os efeitos da aplicação de Si a partir de fonte comercial de maior solubilidade (Agrosilício Plus®) e de fonte alternativa menos solúvel (pó de rocha silicatada subproduto da mineração) na adsorção de P e na biometria de plantas de feijoeiro-comum;
- Avaliar a adequação da isoterma de Langmuir na descrição da adsorção de P pelo LVd sob variação de adição de Si.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização do ambiente

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, entre os meses de maio e outubro de 2022, na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), *campus* Araras (SP), georreferenciado em 22°18'48"S e 47°23'03"W a 693 metros de altitude (Figura 5). O clima da região, segundo classificação de Köppen-Geiger, é do tipo Cwa, mesotérmico, com verões quentes e úmidos, além de precipitação e temperatura médias de 1.400 mm e 22 °C, respectivamente.



Figura 5. Coordenadas geográficas da casa de vegetação na UFSCar – Araras.

Fonte: GOOGLE EARTH (2022).

4.2. Delineamento experimental

O delineamento do experimento foi inteiramente casualizado arranjado em esquema fatorial $5 \times 2 + 2$, com 11 repetições. Os tratamentos incluíram cinco doses de silício (0, 200, 400, 600 e 800 kg/ha) (ALOVISI et al., 2014) e duas fontes de Si [silicato de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) comercial (Agrosilício Plus® da Agronelli Soluções) e pó de rocha silicatada como subproduto de mineração de granito rosa da Pedreira Jundiáí, Grupo Tavares Pinheiro], além dos controles T0, contendo somente o solo sem nenhum tratamento com calagem, adubação ou acréscimo de Si, e Ta, contendo o solo corrigido e adubado mas sem acréscimo de Si. O experimento contou com 132 unidades experimentais, representadas por vasos plásticos. Foram usados 96 vasos (8 repetições por tratamento) com capacidade de 11 dm³, para o cultivo de

plantas de feijoeiro e, 36 vasos de 1 dm³ (3 repetições por tratamento), para o estudo da adsorção de P através da análise pelo método *batch* e pela isoterma de Langmuir (item 4.12).

4.3. Cultivar escolhida

A cultivar de feijão carioca comum (*Phaseolus vulgaris* L.) escolhida para o cultivo no experimento é conhecida, comercialmente, como BRS Estilo (denominação pré-comercial de CNFC 9461), desenvolvida pela EMBRAPA Arroz e Feijão, através do cruzamento EMP 250 /4/ A 769 /// A 429 / XAN 252 // V 8025 / PINTO VI 114. Em termos biométricos, a cultivar BRS Estilo possui hábito de crescimento indeterminado do tipo II com porte semi-ereto, o que viabiliza a mecanização, melhor condução das plantas em vaso no experimento em questão, além de resistência ao acamamento. O seu ciclo normal varia de 85 a 90 dias desde a emergência das plântulas até à maturação fisiológica (EMBRAPA, 2009). As sementes foram adquiridas através da empresa Sementes Orient, localizada no município de Patos de Minas (MG) e, armazenadas em ambiente seco e fresco.

4.4. Fontes de silício (Si)

O silicato de cálcio e magnésio comercial sob o nome de Agrosilício Plus® produzido pela empresa Agronelli Soluções, foi utilizado como fonte convencional de Si, com garantias de 25%, 6% e 10,5% de Ca, Mg e Si, respectivamente.

A fonte alternativa de Si consistiu em um pó de granito rosa coletado na Pedreira Jundiáí, no município de mesmo nome localizado no Estado de São Paulo, pertencente ao Grupo Tavares Pinheiro, com teores de sílica variando entre 74% e 76,8% (46,75% de Si), além de 4,18% de K, Ca e Mg < 0,01% e P₂O₅ < 0,01%. Após a coleta em campo, o pó de rocha foi seco à temperatura ambiente durante 3 dias e, em seguida, peneirado (malha de 2 mm) e acondicionado em sacos plásticos.

4.5. Solo

Foram utilizadas amostras da camada 0-20 cm de um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) de textura argilosa (SANTOS et al., 2018), coletadas em área experimental da Quadra 3, no Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, *campus* de Araras (SP).

Uma análise química completa do solo foi realizada para fins de fertilidade, a partir da amostragem com minissonda de aço inox na pilha de solo coletado. Os seguintes parâmetros foram determinados: P extraído por resina trocadora de íons (P resina); matéria orgânica (M.O);

pH em solução de CaCl_2 0,01 M; teores de K, Ca e Mg, Al, enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), Fe, manganês (Mn) e zinco (Zn); acidez potencial (H+Al); soma de bases (SB); capacidade de troca catiônica (CTC); saturação por bases (V%) e; saturação por alumínio (m%) (RAIJ et al., 2001; EMBRAPA, 2009) (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados de análise química para fins de fertilidade de um Latossolo Vermelho Distrófico, coletado na quadra 3 da UFSCar – Araras (SP) na profundidade de 0 a 20 cm.

P resina	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC
mg/dm ³	CaCl ₂				mmol _c /dm ³			
34	5,3	2,8	33	8	25	1,2	43,8	68,8

M.O.	V	m	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
g/dm ³	%	%	mg/dm ³					
23	64	2,7	19	0,41	3,3	2,3	34,4	2,9

SB = Ca + Mg + K; CTC_t = SB + (H+Al); V (%) = (SB/CTC_t) x 100; m (%) = (Al/CTC_e) x 100; CTC_{te} = SB + Al

O LVd apresentou propriedades químicas iniciais consideradas adequadas para o cultivo do feijoeiro nas condições do Estado de São Paulo (V% igual a 70% e teor de Mg mínimo de 5 mmol_c/dm³) (RAIJ et al., 1997). O solo permaneceu sob secagem por, no mínimo, 48 horas, com revolvimento diário. Em seguida, o solo seco foi passado em peneira com malha de 2 mm e armazenado para posterior adição dos tratamentos.

4.6. Incubação do solo com as fontes de silício (Si)

As duas fontes de Si, pó de rocha silicatada e Agrosilício Plus®, foram pesadas considerando uma incubação com 100 kg de solo por tratamento e o preenchimento de cada vaso de 11 dm³ e 1 dm³ com 12 kg e 1,2 kg de solo, respectivamente, sendo que a densidade do solo foi estimada em 1,2 kg/dm³. Desconsiderando as doses de 0 kg/ha das duas fontes de Si e os 2 tratamentos controle, foram pesadas as seguintes quantidades de fontes de Si:

- T0 (somente o solo)
- Ta (solo corrigido e adubado, sem acréscimo de Si)
- T1 (fonte convencional e dose 0 kg/ha): 0 g de Agrosilício Plus®
- T2 (fonte convencional e dose de 200 kg/ha): 79,4 g de Agrosilício Plus®
- T3 (fonte convencional e dose de 400 kg/ha): 158,8 g de Agrosilício Plus®
- T4 (fonte convencional e dose de 600 kg/ha): 238,1 g de de Agrosilício Plus®
- T5 (fonte convencional e dose de 800 kg/ha): 317,5 g de de Agrosilício Plus®

- T6 (fonte alternativa e dose 0 kg/ha): 0 g de pó de rocha
- T7 (fonte alternativa e dose de 200 kg/ha): 24 g de pó de rocha
- T8 (fonte alternativa e dose de 400 kg/ha): 50 g de pó de rocha
- T9 (fonte alternativa e dose de 600 kg/ha): 75 g de pó de rocha
- T10 (fonte alternativa e dose de 800 kg/ha): 95,9 g de pó de rocha

A partir da pilha de solo peneirado, baldes plásticos foram pesados com 10 kg de solo e o conteúdo despejado no interior de uma betoneira para a mistura do solo com as fontes e doses de Si. O processo foi repetido 10 vezes por tratamento até se atingir a massa de 100 kg de solo. Com a betoneira em funcionamento, as fontes de Si foram adicionadas ao solo para a completa homogeneização (Figura 6), sendo que o tempo de mistura para cada tratamento foi de 15 minutos. Para os tratamentos controle (T0 e Ta) e as doses de 0 kg/ha de cada fonte de Si (T1 e T6), apenas o solo foi misturado na betoneira.



Figura 6. Aplicação do Agrosilício Plus® no tratamento T2 (fonte convencional e dose de 200 kg/ha) em 100 kg de solo.

Sacos plásticos (40 cm x 60 cm) foram etiquetados e utilizados para acomodar o solo durante a incubação por 30 dias com as fontes de Si visando a ocupação prévia dos sítios de adsorção (ALOVISI et al., 2014). Decorrido o tempo da homogeneização do solo com as

fontes de Si, 8 e 3 sacos foram preenchidos com 12 kg e 1,2 kg de solo, respectivamente, a partir da coleta do solo do interior da betoneira com o auxílio de conchas metálicas e pesagem em balança. Desta forma, totalizou-se 11 repetições (sacos plásticos) por tratamento que foram acomodadas sobre bancadas metálicas cobertas com lonas plásticas (Figura 7)

O monitoramento da umidade do solo foi realizado a cada 48 horas. Para isto, cinco sacos, com 12 kg e 1,2 kg de solo, cada, eram amostrados aleatoriamente e pesados em balança para o cálculo da média aritmética do peso. A quantidade de água adicionada era calculada pela diferença entre o peso final do saco com umidade equivalente a 70% da capacidade de campo (CC) e o peso médio dos vasos obtido a cada monitoramento.



Figura 7. Sacos plásticos acondicionados em bancadas para o período de incubação do solo com fontes de Si.

4.7. Preenchimento dos vasos e adubação de plantio

Após o período de incubação com as fontes e doses de Si, o solo foi transferido dos sacos plásticos para vasos de 11 dm³ e 1 dm³, previamente lavados e etiquetados. Concomitantemente a esta etapa, ocorreu a adubação de semeadura inicial de acordo com a análise de solo (Tabela 3) e recomendações para a cultura do feijoeiro (RAIJ et al., 1997) (Tabela 1), considerando a demanda nutricional e a produtividade esperada de 3,5 a 4,5 t/ha de grãos. Adicionou-se 1,93 g do fertilizante misto formulado 04-14-08, para cada vaso de 11 dm³ e, 0,193 g para os vasos de 1 dm³ com o objetivo de fornecer 20 kg/ha de N, 40 kg/ha de P₂O₅ e 40 kg/ha de K₂O. O fornecimento de micronutrientes não foi necessário.

A pesagem do fertilizante foi feita em balança de precisão. Para a adubação, um sulco central de 7 cm foi aberto para acomodar o fertilizante, juntamente com a realização da semeadura em sulcos adjacentes. Os vasos foram acomodados em bancadas metálicas (Figura 8) seguindo a casualização feita no *software* R Studio (versão 1.4.1717). A umidade do solo foi mantida a 70% da CC [estipulada em 25% (ZWIRTES et al., 2011; ROSA et al., 2018)], através de pesagens diárias de cinco vasos amostrados aleatoriamente.



Figura 8. Disposição final dos vasos de a) 11 dm^{-3} e b) 1 dm^{-3} nas bancadas.

4.8. Inoculação e semeadura

A semeadura da cultivar BRS Estilo contou com cinco sementes por vaso, em sulcos com 5 cm de profundidade. As sementes foram previamente tratadas com o inoculante Biomax Premium Líquido Feijão® do Grupo Vittia (150 mL do produto para cada 50 kg de sementes), com a presença da bactéria nodulífera *Rhizobium tropici*, na dose de 1,5 mL do produto, aferido em pipeta volumétrica, para 500 g de sementes.

4.9. Adubação de cobertura

A adubação de cobertura foi realizada com sulfato de amônio (20% de N) aos 23 dias após a emergência das plântulas (DAE) e teve como base a classe de resposta do solo, considerada alta (culturas irrigadas, solos arenosos, cultivo após gramíneas ou solos compactados), e a produtividade média por hectare da cultivar de feijão utilizada no experimento (de 3,5 a 4,5 t/ha) (Tabela 2) (RAIJ et al., 1997). O fertilizante foi pesado em balança analítica com precisão de 0,001 g, visando fornecer 90 kg/ha de N, sendo aplicado,

aproximadamente, 2,25 g e 0,225 g nos vasos de 11 dm³ e 1 dm³, respectivamente, ao lado das plantas de feijoeiro.

4.10. Tratos culturais

O desbaste foi realizado aos 20 DAE seccionando-se as plantas na altura do colo com o objetivo de selecionar 2 indivíduos por vaso (ALOVISI et al., 2014). As catações manuais de plantas espontâneas foram realizadas a cada 15 dias.

4.11. Avaliações biométricas

Na fase entre o período de pleno florescimento (estádio fenológico R6) e de formação das vagens (estádio fenológico R7), ou seja, no qual 100% das plantas já possuíam a primeira flor aberta e a formação das primeiras vagens (canivetes) tinha se iniciado (Figura 9) (OLIVEIRA, 2018), prosseguiu-se as avaliações biométricas na planta mais vigorosa de cada vaso, considerando um ciclo de 53 dias.



Figura 9. Plantas de feijoeiro-comum aos 53 dias após a emergência entre os estádios de pleno florescimento e formação das vagens.

Essas informações foram obtidas pelos seguintes parâmetros:

- **Diâmetro do caule (DC):** determinado com paquímetro na altura do colo da planta (próximo ao nível do solo), em centímetros (cm) (Figura 10) (BASTOS et al., 2016).



Figura 10. Determinação do diâmetro do caule na altura do colo da planta.

- **Índice de Clorofila Falker total (ICFt):** determinado por método indireto através de clorofilômetro portátil ClorofiLOG® (modelo CFL 1030), realizando-se uma leitura na face adaxial de cada trifólio da folha composta (Figura 11) logo abaixo à inserção do prolongamento da haste principal, totalizando-se três leituras por planta (BELLONI, 2016). Os índices de clorofila a, b e total (a + b) são expressos em unidade adimensional de Índice de Clorofila Falker (ICF), no qual o equipamento quantifica, de forma óptica, a radiação transmitida através das folhas em três comprimentos de onda: dois na faixa do vermelho, próximos aos picos de absorção da clorofila a (635 nm) e b (660 nm) e, um no infravermelho próximo (880 nm) (FALKER, 2011; SALGADO et al., 2012). A combinação dos valores de transmitância nesses três comprimentos resulta no ICF (FALKER, 2011).



Figura 11. Leitura do ICF nos 3 trifólios de uma folha composta por planta.

- **Altura de plantas (AT):** seccionou-se a parte aérea da planta e a altura foi determinada com trena do colo até o ápice do meristema apical (término do prolongamento da haste principal), em cm (Figura 12) (CUNHA et al., 2013).



Figura 12. Medição do comprimento da haste principal.

- **Massa de matéria fresca de parte aérea (MMFA):** as plantas seccionadas foram armazenadas em sacos de papel e pesadas em balança analítica com precisão de 0,001 g (o peso do saco foi desconsiderado), em gramas (g) (FRANCO et al., 2016).

- **Massa de matéria seca de parte aérea (MMSA):** a biomassa vegetal foi submetida à secagem em estufa de circulação forçada de ar à temperatura entre 65 °C e 70 °C durante 72 h e posterior pesagem em balança analítica com precisão de 0,001 g (o peso do saco foi desconsiderado), em g (OLIVEIRA et al., 2000; FRANCO et al., 2016).

4.12. Experimento de adsorção tipo “batch” e isothermas de Langmuir

O estudo da adsorção dos íons de P pelo LVd foi conduzido através do método *batch* de laboratório (SOARES e CASAGRANDE, 2009). Amostras de solo foram coletadas em cada repetição dos vasos de 1 dm³ e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 65 °C durante 96 h.

Em laboratório, pesou-se 2 g de solo (M_{solo}) em tubos de centrífuga do tipo Falcon de polietileno com capacidade de 50 mL, sendo 3 repetições para cada dose de P com 18 tubos por tratamento, totalizando 216 parcelas experimentais. Em seguida, adicionou-se aos tubos 20 mL (V_{sol}) de solução contendo doses crescentes de P (concentração inicial C_0 - 0, 40, 80, 160, 320, 640 mg L⁻¹), utilizando o fosfato potássico monobásico (KH₂PO₄, p.a.) como fonte para o preparo de uma solução estoque de 1.000 mg L⁻¹ de P (CASAGRANDE et al., 2003).

As soluções estoques nas concentrações de 0 a 640 mg L⁻¹ foram preparadas pipetando-se o volume referente a concentração inicial de P desejada (por exemplo 40 mL da solução estoque de 1000 mg L⁻¹ de P para a dose de 40 mg L⁻¹ de P) em um balão volumétrico de 1 L, completando-se o volume com solução de CaCl₂ 0,0025 mol L⁻¹ (solução de eletrólito suporte). O sistema solo-solução foi colocado em agitação horizontal a, aproximadamente, 92 batidas por minuto, sob condições normais de temperatura e pressão, durante 24 h para equilíbrio da reação de adsorção. Decorrido o tempo da agitação, realizou-se a separação das fases líquida e sólida por meio de uma filtragem em funis de vidro com papel de filtro quantitativo de faixa azul para filtragens lentas. A obtenção de um extrato límpido se deu em coletores universais com posterior transferência para os tubos Falcon de 50 mL que foram armazenados sob refrigeração.

A partir da obtenção dos extratos, a concentração de P na solução de equilíbrio (C_e) foi determinada por espectrofotometria de emissão atômica (RAIJ et al., 2001) e a concentração adsorvida ($[]_{ads}$) foi calculada pela equação:

$$[]_{ads} = \frac{[V_{sol}(C_0 - C_e)]}{M_{solo}} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que $[]_{ads}$ é a concentração adsorvida (mg kg^{-1}), V_{sol} é o volume de solução (L), C_0 é a concentração da solução inicialmente adicionada (mg L^{-1}), (C_e) é a concentração remanescente na solução de equilíbrio (mg L^{-1}) e M_{solo} é a massa de amostra de solo (kg) (SOARES e CASAGRANDE, 2009)

Os valores observados de adsorção de P foram ajustados pela forma não-linear da equação de Langmuir (equação 1: $[]_{ads} = (K_L C_{eq} A_{ds_{m\acute{a}x}})/(1 + K_L C_{eq})$, com vistas à verificar a descrição e reprodutibilidade do fenômeno de adsorção pelo modelo matemático e à identificar variações dos parâmetros $A_{ds_{m\acute{a}x}}$ (capacidade de adsorção máxima após a formação da camada monomolecular do soluto sobre o adsorvente, em mg/kg) e K_L (coeficiente de Langmuir relacionado com a afinidade do soluto pelo adsorvente, em L/kg) (SOARES e CASAGRANDE, 2009) sob condições de fornecimento de Si.

4.13. Forma de análise dos resultados

Os resultados de biometria das plantas foram submetidos a análise de variância (ANOVA), e, quando significativa pelo teste F ($p < 0,05$), as médias dos tratamentos foram analisadas pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$). Para a análise estatística dos parâmetros biométricos em função das fontes e doses de silício, retirou-se observações *outliers* a fim de atender os pressupostos da ANOVA de distribuição normal e homogeneidade das variâncias, ou homocedasticidade, dos resíduos dos dados observados.

Os resultados foram ajustados por análise de regressão dos parâmetros biométricos em função das doses e das fontes de silício. O procedimento estatístico foi desempenhado pelo software RStudio versão 1.4.1717. Os resultados de adsorção de P foram ajustados ao modelo de Langmuir, pelo software OriginPro (versão 2022b), e comparados com os resultados observados a partir dos coeficientes de determinação (R^2).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Parâmetros biométricos

A Tabela 4 apresenta os resultados médios e o resumo da ANOVA para os parâmetros biométricos de plantas de feijoeiro-comum avaliadas aos 53 dias após a emergência em função de fontes e doses de Si.

Tabela 4. Médias e análise de variância (ANOVA) dos parâmetros biométricos do feijoeiro-comum cultivar BRS Estilo cultivado em Latossolo Vermelho Distrófico com diferentes fontes e doses de Si.

Tratamentos	DC	AT	ICFt	MMFA	MMSA
	cm			g	
Agrosilício Plus®					
0 (T1)	0,55	73,31	36,65	57,90	12,23
200 (T2)	0,58	86,66	39,42	62,98	13,40
400 (T3)	0,59	84,56	42,05	67,56	14,75
600 (T4)	0,55	94,16	42,91	58,90	13,69
800 (T5)	0,59	91,86	44,45	72,37	16,78
Pó de rocha silicatada					
0 (T6)	0,57	100,28	43,04	73,73	15,20
200 (T7)	0,64	97,14	41,10	67,28	15,17
400 (T8)	0,59	83,5	40,18	67,03	14,65
600 (T9)	0,59	78,47	40,55	69,85	14,16
800 (T10)	0,61	100,25	41,67	71,78	14,80
Testemunhas					
T0	0,45	54,96	30,2	24,47	3,45
Ta	0,55	87,19	36,55	70,20	14,93
Teste F – ANOVA					
Fonte	0,07 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,03*	0,24 ^{ns}
Dose	0,27 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,02*	0,37 ^{ns}	0,23 ^{ns}
F x D	0,84 ^{ns}	0,13 ^{ns}	2.10 ⁻⁵ *	0,32 ^{ns}	0,11 ^{ns}
Testemunhas	0,01*	0*	2.10 ⁻⁵ *	0*	0*
Testemunhas x fatorial	5.10 ⁻⁵ *	0*	0*	0*	0*
CV	12,22%	25,28%	6,85%	18,97%	19,05%

ns: não significativo; * significativo a 5%.

DC: diâmetro do caule na altura do colo; AT: altura total; ICFt: Índice de Clorofila Falker total (a + b); MMFA: massa de matéria fresca de parte aérea; MMSA: massa de matéria seca de parte aérea.

Os resíduos dos resultados de todos os parâmetros biométricos avaliados apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk e homocedasticidade pelo teste de Bartlett, ao nível de significância de 5%.

5.1.1. Diâmetro do caule (DC)

O coeficiente de variação (CV) dos resultados de DC foi considerado baixo (12,22%), indicando uma boa precisão experimental. Não houve efeitos significativos dos fatores isolados ou da interação entre os fatores fontes e doses de Si sobre os resultados de DC (Tabela 4). Cessa et al. (2011) notaram efeito no aumento do diâmetro do caule de plantas de sorgo em função das doses de P (0, 280, 560, 840 e 1.120 kg/ha) e não devido as doses de Si ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ a 0, 100, 200, 300, 400 e 500 mg dm^{-3}) ou a interação, em um Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa.

Observou-se diferenças significativas entre as plantas das testemunhas adicionais (Tabela 4), sendo que o controle Ta apresentou a maior média para este parâmetro (0,55 cm) em relação ao T0 (0,45 cm), indicando um efeito das adubações de plantio e de cobertura na promoção de crescimento e espessura do caule para as plantas de feijoeiro-comum. Além disso, houve diferença significativa entre as testemunhas e o fatorial (Tabela 4), tal que as plantas que receberam a adição de fontes e doses de Si apresentaram média superior (0,58 cm) às daquelas sob os tratamentos controle (0,50 cm).

5.1.2. Altura de plantas (AT)

A altura de plantas foi o parâmetro biométrico que apresentou a mais alta variação experimental (CV = 25,23%). Fontes e doses de Si, assim como a interação desses fatores, não provocaram diferenças significativas na AT (Tabela 4). Assim como para o diâmetro do caule, Cessa et al. (2011) atribuíram a maior altura de plantas de sorgo às doses de P e não às doses de Si ou ao fatorial. Os resultados obtidos diferem do que Sandim et al. (2014) avaliaram para a cultura do milho, haja visto que as plantas apresentaram maior estatura quando submetidas a diferentes doses de P (0, 100 e 300 kg/ha) associadas a aplicação de corretivos de acidez (doses calculadas para elevar o V% a 70%), em especial a escória de aciaria, subproduto com concentrações de Si que variam entre 15 e 20%.

Observou-se um efeito da adubação NPK na altura das plantas dos tratamentos adicionais, sendo que o controle Ta apresentou média significativamente superior (87,19 cm) à do T0 (54,96 cm). As diferenças também foram significativas entre as testemunhas (71,08 cm) e a interação (89,23 cm) (Tabela 4).

As plantas do tratamento T0 se desenvolveram menos apresentando a menor média para a altura de plantas (54,96 cm), seguidas daquelas sob o T1 [fonte convencional na dose 0 kg/ha (73,31 cm)], com efeitos divergentes em termos do fornecimento de nutrientes via adubação, uma vez que a dose de Si foi nula para o T1. As maiores médias para este parâmetro foram observadas nos tratamentos T6 e T10 (pó de rocha silicatada nas doses de 0 kg/ha e 800 kg/ha, respectivamente) considerando que não houve efeitos isolados dos fatores ou da interação para a altura das plantas.

5.1.3. Índice de Clorofila Falker total (ICFt)

O ICFt foi o parâmetro biométrico que apresentou a mais baixa variação experimental (CV = 6,85%). O fator fonte de Si não se mostrou significativo para a quantificação do ICFt nas plantas de feijoeiro-comum, diferentemente do fator dose e da interação entre os fatores (Tabela 4).

A partir dos desdobramentos dos níveis de doses dentro de cada fonte de Si, o modelo de regressão linear ($R^2 = 0,96$) foi o que melhor descreveu o comportamento do ICFt para as cinco doses de Si dentro da fonte convencional, o Agrosilício Plus® (Figura 13). A reta ajustada indicou um padrão crescente do ICFt com o aumento das doses de Si, sendo que a equação da reta mostra um acréscimo de 0,0095 de clorofila total a cada 1 kg/ha de Si. O fornecimento de 800 kg/ha de Si (T5) proporcionou o maior acúmulo de clorofila total (44,45) em comparação a dose nula de Si para esta fonte (T1) com o ICFt médio de 36,65.

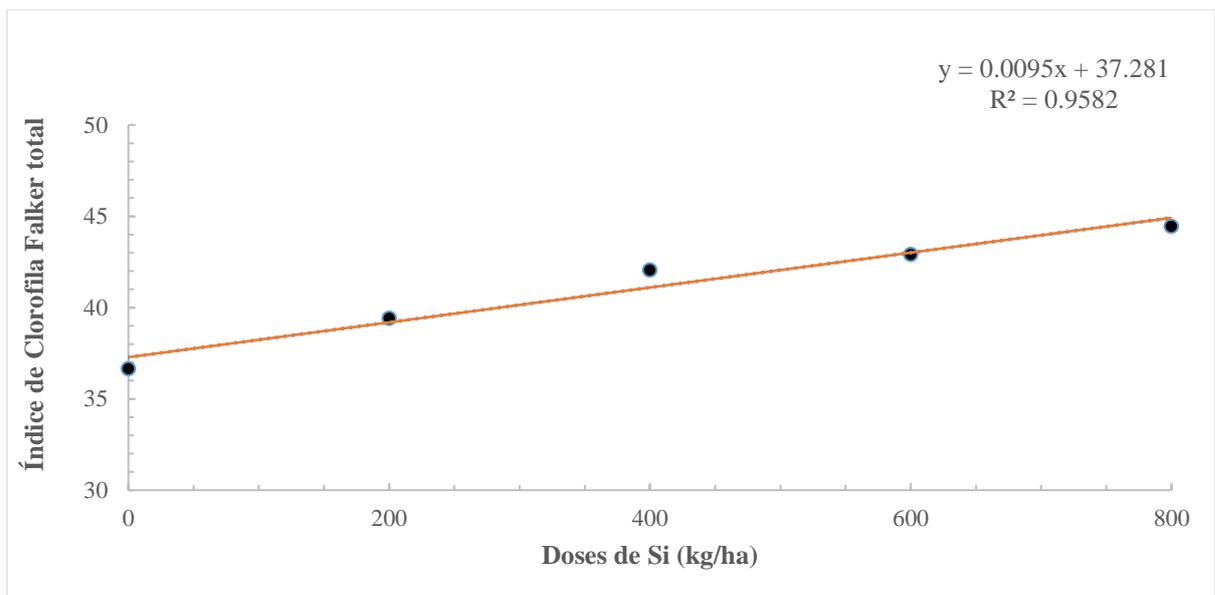


Figura 13. Índice de Clorofila Falker total (ICFt) em função das doses de Si adicionadas pelo Agrosilício Plus®.

Sabe-se que o P tem papel fundamental no armazenamento e transferência de energia na forma de ATP, além de atuar no transporte de elétrons durante a fotossíntese, colaborando com a produção de substâncias orgânicas e consequente aumento dos teores de clorofila nas plantas (MALAVOLTA, 2006). Resultados similares foram encontrados por Oliveira et al. (2015) que observaram um aumento do teor relativo de clorofila (clorofila SPAD) e da taxa fotossintética em plantas de espinafre (*Tetragonia tetragonoides* L. cv. Nova Zelândia) a partir de doses crescentes de P (0; 15,5; 31; 46,5 e 62 kg/ha) em solução nutritiva.

Para diferentes cultivares de feijão, Oliveira et al. (2012) não encontraram diferenças significativas no ICFt entre dezenove genótipos avaliados em ambientes com alto (120 kg/ha) e baixo (20 kg/ha) nível de P e cultivados sobre um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média, demonstrando não haver relação direta entre os teores de clorofila total e a produtividade de grãos.

Para o desdobramento das doses dentro da fonte alternativa de Si, o modelo de regressão polinomial quadrático foi o que melhor descreveu ($R^2 = 0,99$) as variações do ICFt com a adição de pó de rocha silicatada proveniente do granito rosa (Figura 14). A curva gerada pelo modelo indicou um decréscimo dos teores de clorofila em função do aumento das doses de Si, devido, possivelmente, a menor solubilidade desta fonte em um curto período, impactando na menor disponibilização de Si no solo para competir pelos sítios de adsorção de P nos coloides, e a fisiologia das plantas de feijoeiro, que diminuem a absorção de P após a fase de maior extração deste nutriente no pico do florescimento, com menor produção e acúmulo de clorofila. O efeito da adubação fosfatada na produção e acúmulo de clorofila total pode ter sido maior em comparação ao fornecimento de Si via pó de rocha em razão do maior ICFt médio para o tratamento T6 [dose 0 kg/ha (43,04)] em contrapartida às médias dos tratamentos com maiores doses de Si, em especial o T10 com 800 kg/ha de Si (41,67).

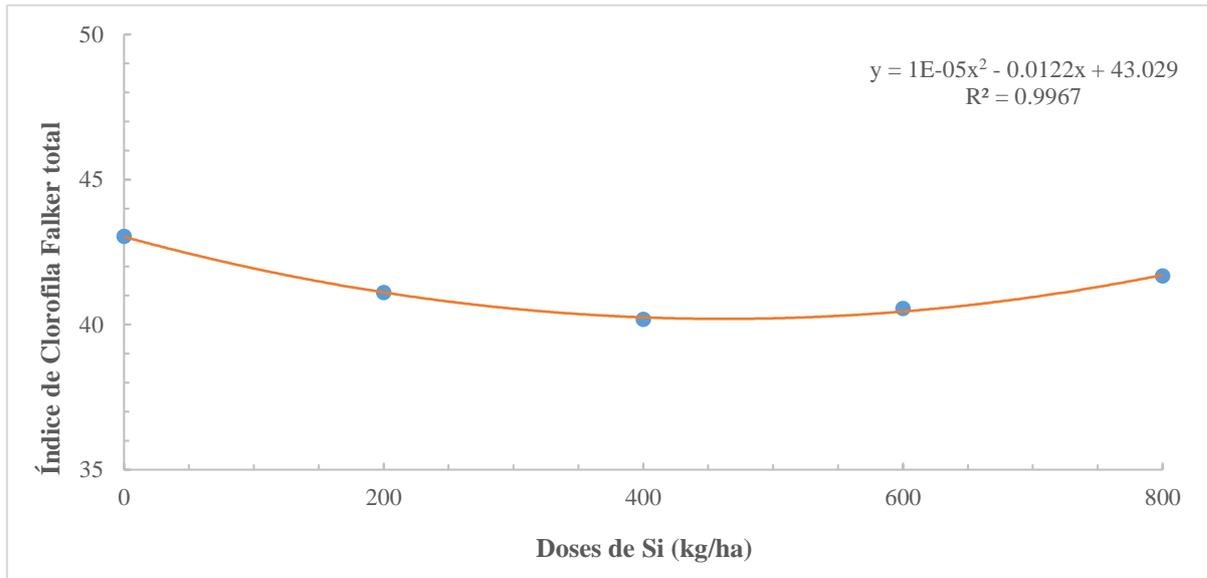


Figura 14. Índice de Clorofila Falker total (ICFt) em função de doses de Si adicionadas pelo pó de rocha silicatada.

Considerando o desdobramento dos níveis de fonte dentro de cada dose para a interação (Tabela 5), não houve diferenças significativas entre as fontes convencional e alternativa para as doses de 200 kg/ha, 400 kg/ha e 600 kg/ha de Si. Para a dose de 0 kg/ha, o pó de rocha silicatada foi o que apresentou o maior ICFt médio pelas plantas de feijoeiro, não sendo possível a atribuição do maior teor de clorofila total ao efeito do Si devido a sua ausência neste tratamento. No entanto, para a dose de 800 kg/ha, as plantas cultivadas com o Agrosilício Plus® apresentaram o maior teor de clorofila total, o que pode ser explicado pela maior solubilidade deste fertilizante mineral em comparação ao pó de rocha silicatada.

Tabela 5. Médias dos Índices de Clorofila Falker total (ICFt) para o feijoeiro-comum cultivado em Latossolo Vermelho Distrófico em função de fontes e doses de Si.

Fontes de Si	Doses de Si (kg/ha)				
	0	200	400	600	800
Agrosilício Plus®	36,65 B	39,42 A	42,05 A	42,91 A	44,45 A
Pó de rocha silicatada	43,04 A	41,11 A	40,2 A	40,55 A	41,68 B

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Houve diferença significativa entre os tratamentos controle, sendo que as plantas cultivadas em solo corrigido e adubado (Ta) apresentaram maior ICFt médio (36,55) em relação àquelas sobre o solo sem qualquer tratamento (T0 - 30,20). Além disso, o fatorial diferiu

significativamente das testemunhas adicionais, com médias dos teores totais de clorofila iguais a 41,29 e 33,16, respectivamente (Tabela 4).

5.1.4. Massas de matéria fresca (MMFA) e seca de parte aérea (MMSA)

Assim como a altura de plantas, os resultados de MMFA e MMSA das plantas de feijoeiro apresentaram alta variação (CV = 18,98% e 19,05%, respectivamente; Tabela 4). Para MMFA, não foram observados efeitos das doses de Si e da interação entre fontes e doses. O fator fonte de Si se mostrou significativo (Tabela 4), sendo que o pó de rocha silicatada promoveu maior acúmulo de MMFA (70,09 g) em comparação ao Agrosilício Plus® (64,06 g).

As plantas cultivadas no tratamento Ta apresentaram, em média, maior acúmulo de MMFA (70,20 g) do que aquelas do T0 (24,48 g), diferindo significativamente entre si (Tabela 4). Este resultado demonstra o efeito das adubações de plantio e de cobertura no melhor crescimento e desenvolvimento das plantas de feijoeiro-comum. Apesar de a interação não ter sido significativa, o fatorial diferiu das testemunhas adicionais (Tabela 4), com médias de 66,92 g e 47,34 g, respectivamente. As médias de MMFA variaram de 24,48 g, para o controle contendo somente o solo, à 73,73 g, para o tratamento T6 (pó de rocha silicatada na dose de 0 kg/ha).

Não houve efeitos isolados de fontes e doses de Si sobre a MMSA. A interação também não promoveu diferenças no acúmulo de MMSA pelas plantas de feijoeiro (Tabela 4). Alovisei et al. (2014) não observaram efeitos significativos para a interação entre doses de P e de Si na produção de MMSA do feijoeiro-comum sobre Latossolo Vermelho Distroférrico, com diferenças apenas em função das doses de P devido à baixa concentração inicial deste nutriente no solo.

Os resultados observados corroboram Torres et al. (2020), que também utilizaram fontes alternativas de Si para avaliar a produção de MMSA do feijoeiro-comum cultivado em um Latossolo de textura franco-arenosa. A MMSA foi relativamente menor com a aplicação de *biochars* provenientes de esterco bovino e casca de arroz em comparação a tratamentos controle que receberam a aplicação de carbonatos e silicatos de Ca e Mg, além da adubação NPK mineral.

No entanto, houve diferença significativa das testemunhas adicionais em relação ao fatorial (Tabela 4), com médias de MMSA iguais a 9,19 g e 14,46 g, respectivamente, o que pode ser explicado pelo menor acúmulo de MMSA pelo controle T0 (3,45 g) uma vez que este diferiu estatisticamente do tratamento Ta (14,93 g; Tabela 4). O intervalo de MMSA variou de 3,45 g (T0) a 16,78 g (T5, Agrosilício Plus® na dose de 800 kg/ha).

5.2. Isotermas de adsorção de fósforo (P)

O modelo não-linear de Langmuir ajustado às concentrações de P na solução de equilíbrio (C_e) e adsorvido ($[]$ ads) descreveu adequadamente os resultados observados, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) médio igual à 0,84, variando de 0,75 (T1) a 0,88 (T5 e T8) (Figura 15). O emprego bem-sucedido da isoterma de Langmuir para descrever a adsorção de P em solos brasileiros também foi relatado em outros estudos (VALLADARES et al., 2003; FARIAS et al., 2009; FALCÃO e SILVA, 2004; VIEIRA et al., 2021).

Com o aumento da concentração inicial (C_0), observou-se o aumento da adsorção de P (Figura 15). Esta é uma tendência observada em muitos estudos sobre a adsorção de P em solos (CASAGRANDE e CAMARGO, 1997; VALLADARES et al., 2003; FARIAS et al., 2009; FALCÃO e SILVA, 2004; AMARH et al., 2021; VIEIRA et al., 2021), em que a adsorção é inicialmente representada por uma linha reta inclinada, em função de pequenas diferenças de concentração de P, que posteriormente se encurva, suavemente, com a maior amplitude da concentração inicial de P. Somente a isoterma ajustada para T1 manifestou uma acentuada inclinação inicial até a dose de 320 mg dm^{-3} de P, com forte e incomum curvatura próxima ao ponto da adsorção máxima ($[]$ ads de P igual a 2.000 mg kg^{-1}).

Logo, a principal feição assumida pelas curvas de adsorção ajustadas pelo modelo de Langmuir (Figura 15) foi a assíntota que, conforme a abordagem de Sposito (1989), caracteriza isotermas do tipo-L. Estas isotermas apresentam como característica típica a constante inclinação inicial que não se altera apesar das variações de concentração do soluto na solução do solo, explicada, principalmente, pela alta afinidade da fase sólida pelo soluto a baixas concentrações. Conforme a afinidade dos coloides pelo soluto diminui, devido a saturação dos finitos sítios de adsorção, a curva assume o formato assintótico indicando um possível equilíbrio da reação de adsorção com a formação de uma camada monomolecular cobrindo homoganeamente a superfície adsorvente (SPOSITO, 1989; FALCÃO e SILVA, 2004; SOARES e CASAGRANDE, 2009).

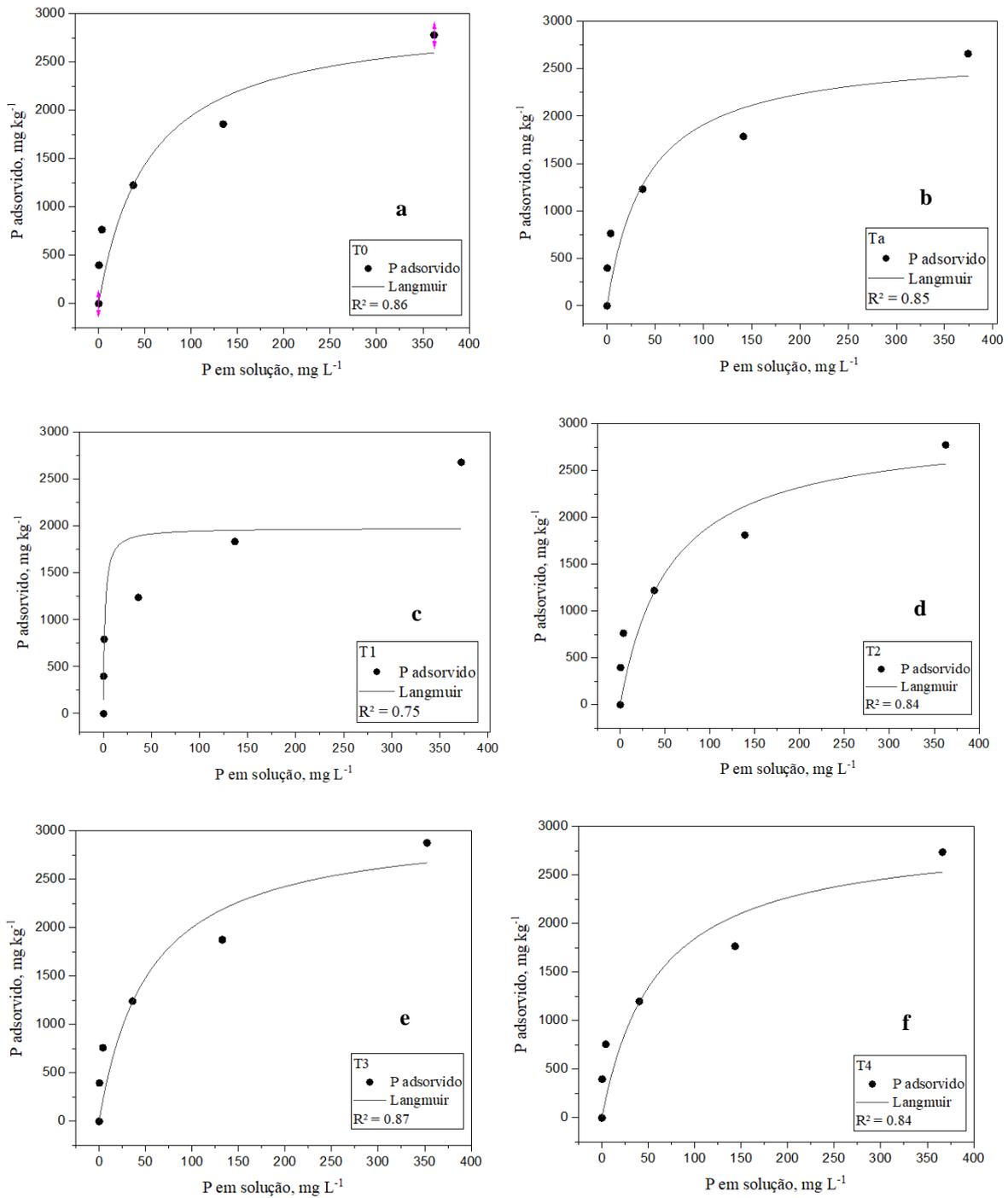


Figura 15. Isothermas de adsorção de P por Latossolo Vermelho Distrófico sob variações de fontes e doses de Si, ajustadas pelo modelo de Langmuir: a) T0 controle; b) Ta controle com solo adubado e corrigido; c) T1, fonte convencional e dose 0 kg/ha; d) T2, fonte convencional e dose 200 kg/ha; e) T3, fonte convencional e dose 400 kg/ha; f) T4, fonte convencional e dose 600 kg/ha; g) T5, fonte convencional e dose 800 kg/ha; h) T6, fonte alternativa e dose 0 kg/ha; i) T7, fonte alternativa e dose 200 kg/ha; j) T8, fonte alternativa e dose 400 kg/ha; k) T9, fonte alternativa e dose 600 kg/ha; l) T10, fonte alternativa e dose 800 kg/ha.

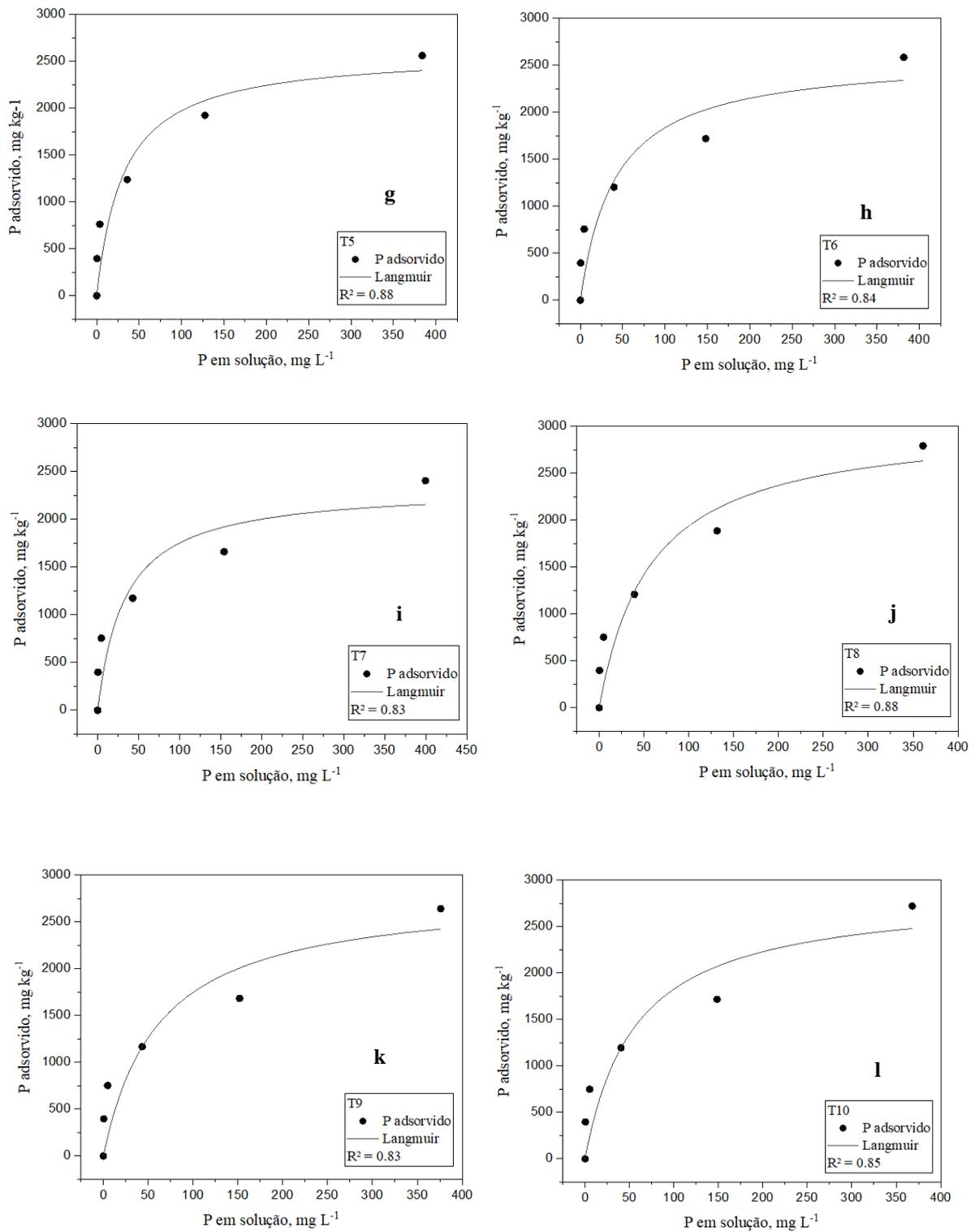


Figura 15. Continuação.

As curvas dos tratamentos T5, T6 e T7 (Figura 1g, 1h e 1i) apresentaram um padrão de estabilidade da reação de adsorção entre as concentrações de [] ads de P de 2.000 a 2.500 mg kg⁻¹, indicando uma relação com a aplicação de Agrosilício Plus®, na dose de 800 kg ha⁻¹, e de pó de rocha silicatada, nas doses de 0 e 200 kg ha⁻¹. Isto pode ser devido a saturação dos

sítios de adsorção dos coloides pelo Si em altas doses (T5) pelo uso da fonte comercial ou pela menor afinidade dos coloides ao P com a aplicação do Si em baixas doses (T6 e T7) da fonte alternativa.

Curvas com típico formato do tipo-L têm sido frequentemente obtidas na descrição da adsorção de P em solos intemperizados, com mineralogia predominantemente oxídica e caulínica, característica da Ordem dos Latossolos à qual pertence o LVd. Falcão e Silva (2004), utilizando oito classes de solos do Estado do Amazonas, incluindo dois Latossolos Amarelos Distróficos argilosos e quatro Latossolos Amarelos Coesos distróficos de textura média, e Amarh et al. (2021), estudando quatro solos intemperizados da região da África subsaariana sob diferentes manejos (área virgem, área em pousio e área cultivada com cacau e banana), aplicaram a isoterma de Langmuir para obter parâmetros de adsorção de P ($Ads_{máx}$ e K_L). Apesar de ambos os estudos terem sido conduzidos com intervalos de concentração de P menores ($0-100 \text{ mg dm}^{-3}$ e $0-45 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente) do que as deste estudo, os autores também obtiveram excelentes ajustes do modelo de Langmuir ($R^2 = 0,99$), com obtenção de isotermas tipo-L. Os valores médios de coeficiente de determinação ($R^2 = 0,84$) (Figura 15) indicaram bom ajuste do modelo de Langmuir aos dados de adsorção de P observados mesmo em doses superiores a 100 mg dm^{-3} .

Os valores de capacidade máxima de adsorção de P ($Ads_{máx}$) variaram de $1.996,69 \text{ mg kg}^{-1}$ para o T1 a $3.077,94 \text{ mg kg}^{-1}$ para o T3 com média igual a $2.740,16 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabela 6).

A avaliação da adsorção a partir de uma faixa mais ampla de concentração inicial de P ($0-640 \text{ mg L}^{-1}$) resultou em curvas com evidente padrão assintótico, permitindo a avaliação do fenômeno em maior extensão e um ajuste matemático da isoterma com a obtenção de valores de $Ads_{máx}$ mais elevados do que os reportados em outros estudos. Vieira et al. (2021) observaram $Ads_{máx}$ de P igual a $87,26 \text{ mg kg}^{-1}$ em um Latossolo Vermelho Amarelo situado na cidade de Mossoró (RN), a partir de doses de P de 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 55, 70 e 80 mg L^{-1} . Um baixo valor de $Ads_{máx}$ de P (200 mg kg^{-1}) também foi obtido por Moreira et al. (2006) em um Latossolo Vermelho Amarelo, utilizando doses menores de P (0; 1; 2; 3,5; 5; 8; 12 e 15 mg kg^{-1}). Os resultados de $Ads_{máx}$ (Tabela 6) também superaram os obtidos por Valladares et al. (2003) para o horizonte Bw de três Latossolos Vermelhos Distróficos originados de rochas ácidas (556 mg kg^{-1}) e rochas sedimentares (500 e 455 mg kg^{-1}), com doses iniciais de P variando de 0 a 135 mg L^{-1} .

Tabela 6. Parâmetros de capacidade de adsorção máxima ($Ads_{m\acute{a}x}$) e coeficiente de afinidade (K_L) obtidos pelo ajuste do modelo de Langmuir aos resultados de adsorção de P em Latossolo Vermelho Distrófico com variação de fontes e doses de Si.

Tratamentos	$Ads_{m\acute{a}x}$, mg kg ⁻¹	K_L , L kg ⁻¹
T0	2.976,28 +/- 597,20	0,018 +/- 0,013
Ta	2.689,10 +/- 509,56	0,024 +/- 0,018
T1	1.996,69 +/- 302,19	0,615 +/- 0,59
T2	2.962,99 +/- 632,47	0,018 +/- 0,013
T3	3.077,94 +/- 593,39	0,018 +/- 0,012
T4	2.939,37 +/- 630,59	0,016 +/- 0,012
T5	2.597,44 +/- 406,50	0,031 +/- 0,020
T6	2.589,36 +/- 490,44	0,024 +/- 0,018
T7	2.331,71 +/- 423,98	0,030 +/- 0,023
T8	3.046,85 +/- 562,16	0,017 +/- 0,011
T9	2.817,33 +/- 629,62	0,016 +/- 0,012
T10	2.856,84 +/- 596,92	0,017 +/- 0,013

* T0 controle; Ta controle com solo adubado e corrigido; T1, fonte convencional e dose 0 kg/ha; T2, fonte convencional e dose 200 kg/ha; T3, fonte convencional e dose 400 kg/ha; T4, fonte convencional e dose 600 kg/ha; T5, fonte convencional e dose 800 kg/ha; T6, fonte alternativa e dose 0 kg/ha; T7, fonte alternativa e dose 200 kg/ha; T8, fonte alternativa e dose 400 kg/ha; T9, fonte alternativa e dose 600 kg/ha; T10, fonte alternativa e dose 800 kg/ha.

A análise de variância para o parâmetro $Ads_{m\acute{a}x}$ (Tabela 7) em função das fontes e doses de Si, indicou que os resíduos apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk (p-valor = 0,6578) e homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett (p-valor = 0,4723). Não houve diferença significativa entre as médias de $Ads_{m\acute{a}x}$ para os fatores fonte e dose de Si e para a interação, indicando que a aplicação de AgrosilícioPlus® e de pó de rocha silicatada em diferentes doses não promoveu alterações no comportamento de adsorção de P pelos coloides do solo. Além disso, as médias das duas testemunhas adicionais, T0 e Ta, não apresentaram diferença significativa, sugerindo que a adubação fosfatada não interferiu na adsorção de P em comparação ao controle contendo somente o solo sem nenhum tratamento, assim como não houve diferença entre as testemunhas e o fatorial. No geral, o coeficiente de variação dos dados em torno da média foi baixo (CV = 11,2241%), apontando a existência de boas condições experimentais e homogeneidade dos dados para o estudo conduzido em casa de vegetação.

Tabela 7. Análise de variância (ANOVA) a $p < 0,05$ para o parâmetro de $Ads_{m\acute{a}x}$ ($mg\ kg^{-1}$) de P em função de fontes e doses de Si.

Fontes de variação	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Fator A (fonte)	1	177.190,7	177.190,8	1,82	0,19067 ^{ns}
Fator B (dose)	4	987.329,8	246.832,5	2,54	0,06873 ^{ns}
Interação A x B	4	138.534,2	34.633,5	0,36	0,83683 ^{ns}
Testemunha	1	159.169,9	159.169,9	1,64	0,21398 ^{ns}
Testemunha x fatorial	1	43.411,0	43.411,0	0,45	0,51088 ^{ns}
Resíduo	22	2.138243,4	97.192,9		
Total	33	3.643879,1			
CV			11,2 %		

GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; CV: coeficiente de variação; Fc: valor de “f” pelo teste F a 5% de significância; p-valor: valor de “p” a 5% de significância; ns: não significativo a $p < 0,05$.

Os resultados do coeficiente de afinidade do soluto pela superfície adsorvente (K_L) se mantiveram entre $0,0163\ L\ kg^{-1}$ para o T9 e $0,6152\ L\ kg^{-1}$ para o T1, sendo a média entre os tratamentos igual a $0,0716\ L\ kg^{-1}$. Esses valores foram inferiores ao encontrado por Vieira et al. (2021) ($K_L = 1,6620\ L\ mg^{-1}$) e ao estimado por Farias et al. (2009) ($K_L = 0,1958\ L\ mg^{-1}$) em um Latossolo Amarelo do Estado da Paraíba com pH igual a 5,9 e predominância de caulinita e goethita na fração argila, utilizando doses de P de 0, 4, 8, 12, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e $80\ mg\ L^{-1}$.

Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) a $p < 0,05$ para o parâmetro de K_L ($L\ kg^{-1}$) em função de fontes e doses de Si.

Fontes de variação	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Fator A (fonte)	1	0,00001	$1 \cdot 10^{-5}$	0,1773	0,67779 ^{ns}
Fator B (dose)	4	0,00025	$6 \cdot 10^{-5}$	0,78208	0,5489 ^{ns}
Interação A x B	4	0,00026	$6 \cdot 10^{-5}$	0,79348	0,54203 ^{ns}
Testemunha	1	0,00002	$2 \cdot 10^{-5}$	0,22579	0,63935 ^{ns}
Testemunha x fatorial	1	0,00001	$1 \cdot 10^{-5}$	0,08389	0,77481 ^{ns}
Resíduo	22	0,00179	$8 \cdot 10^{-5}$		
Total	33	0,00234			
CV			39,9 %		

GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; CV: coeficiente de variação; Fc: valor de “f” pelo teste F a 5% de significância; p-valor: valor de “p” a 5% de significância; ns: não significativo a $p < 0,05$.

Pela análise de variância dos valores do parâmetro K_L em função das fontes e doses de Si (Tabela 8), os resíduos também apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk (p-valor = 0,7634) e homoscedasticidade pelo teste de Bartlett (p-valor = 0,3714). Assim como para o parâmetro de $Ads_{máx}$, não houve diferença significativa entre as médias de K_L para os fatores fonte e dose de Si, assim como para a interação, indicando que o uso de AgrosilícioPlus® e de pó de rocha silicatada em diferentes doses não alterou a afinidade do soluto (P) pelo adsorvente (LVd) devido à presença dos íons silicato ou pelo potencial de dessorção de P pelo Si.

As médias das duas testemunhas adicionais, T0 e Ta, não apresentaram diferença significativa, propondo que o acréscimo de P ao solo via adubação não provocou efeito na afinidade dos íons fosfato em solução pelo solo ou intensificou o fenômeno de adsorção. As médias das testemunhas e do fatorial também não diferiram entre si. No entanto, o coeficiente de variação foi alto (CV = 39,9%), indicando uma ampla distribuição dos resultados observados em torno da média, com menor controle das condições experimentais para este parâmetro.

5.3. Influência do tempo de incubação e granulometria das fontes de silício (Si)

A ausência de efeitos das fontes e doses de Si na maioria dos parâmetros biométricos do feijoeiro-comum e na adsorção de P pelo solo pode estar relacionada a alguns fatores intrínsecos das fontes de Si utilizadas. O primeiro refere-se ao tempo de incubação dos tratamentos contendo o Si, sendo os 30 dias decorridos no presente estudo insuficientes para disponibilizar este elemento na solução do solo e promover alterações no desenvolvimento das plantas de feijoeiro-comum ou na adsorção do P pelo LVd, com sua consequente biodisponibilização.

Em um experimento de longa duração, Alovisei et al. (2021) não observaram alterações significativas nos parâmetros biométricos, nutricionais e de produção da soja após dois anos de aplicação de pó de basalto (51,4% de SiO_2 nas doses 0, 2,5, 5, 7,5 e 10 t/ha) com e sem adubação mineral complementar (200 kg/ha de NPK 05-25-06) em Latossolo Vermelho Distroférico de textura argilosa. Este comportamento indica uma baixa solubilidade natural dos remineralizadores, como o pó de granito rosa utilizado no presente estudo, que justifica a realização de experimentos com avaliações periódicas dos atributos químicos do solo e dos parâmetros biométricos e nutricionais das plantas, a fim de verificar a disponibilização dos nutrientes ao longo do tempo.

A ausência de efeitos de pós de rocha no desenvolvimento de plantas considerando o tempo de aplicação das fontes têm sido relatada por diversos autores. Fernandes et al. (2013),

analisando o potencial de diferentes fontes na eficiência da adubação potássica no desenvolvimento do maxixe-do-reino (*Cyclanthera pedata*) cultivado durante 100 dias em Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico de textura argilo-arenosa, não observaram diferenças significativas nos parâmetros nutricionais e bromatológicos da cultura com a aplicação em dose única e parcelada de pó de rocha granítica (22% de SiO₂, dose de 4,545 t/ha) e cloreto de potássio (103 kg/ha). Prates et al. (2010), em um período de 60 dias de cultivo de mudas de maracujazeiro-amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) em substrato contendo proporções de amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo, obtiveram maiores valores nutricionais e biométricos na ausência de pó de rocha (ardósia, mármore e granito; 0 e 20 kg m⁻³ de substrato) associada a menor dose de superfosfato simples (1,25 kg m⁻³ de substrato).

O segundo aspecto que pode estar associado a ausência de respostas do desenvolvimento do feijoeiro-comum e da adsorção de P é a granulometria do pó de rocha utilizado. Alguns trabalhos obtiveram resultados significativos com a utilização de materiais com menos de 2 mm, a exemplo do pó de basalto com 0,07 mm para o cultivo de mudas de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) em substrato (doses de 0, 10, 20, 30 e 40%), durante 180 dias (EHLERS e ARRUDA, 2014), e com 0,05 e 0,1 mm (0, 0,42, 1,04, 2,08, 4,17 e 8,33 g kg⁻¹) incubado durante 120 dias em Latossolo Amarelo Distrocoeso de textura média para analisar o efeito no desenvolvimento de mudas de camu-camu (*Myrciaria dúbia*) (WELTER et al., 2011). Para a espécie florestal, o pó de basalto nas taxas de 10 a 20% no substrato proporcionou maior altura e diâmetro do colo das plantas (EHLERS e ARRUDA, 2014), enquanto as mudas da espécie frutífera apresentaram os maiores valores de biometria com o pó de rocha mais fino (0,05 mm) na maior dose (8,33 g kg⁻¹), devido, principalmente, a maior superfície de contato do pó de rocha finamente moído com o solo e/ou substrato e consequente disponibilização de nutrientes às plantas (WELTER et al., 2011).

6. CONCLUSÃO

A avaliação de plantas de feijoeiro-comum aos 53 dias após a emergência permite concluir que:

- a aplicação do Agrosilício Plus® e do pó de rocha silicatada em diferentes doses não influencia o padrão de desenvolvimento do feijoeiro-comum descrito pelo diâmetro do caule, altura de planta e massa de matéria seca de parte aérea;

- o uso do pó de rocha silicatada proporciona maior acúmulo de massa de matéria fresca de parte aérea pelo feijoeiro-comum em comparação ao Agrosilício Plus®;

- o Índice de Clorofila Falker total (ICFt) das plantas de feijoeiro-comum aumenta conforme as crescentes doses de Si fornecidas via Agrosilício Plus®. O fornecimento de Si pelo pó de rocha silicatada não altera o ICFt nas plantas de feijoeiro-comum.

Após 30 dias de incubação de amostras de Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) com fontes e doses de Si, conclui-se que:

- o modelo não-linear de Langmuir descreve adequadamente os resultados de adsorção de P sob variação de adição de Si;

- o uso do Agrosilício Plus® e do pó de rocha silicatada não promove efeitos no comportamento de adsorção ($Ad_{s_{máx}}$) e afinidade (K_L) do P pelo LVd.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGROSILÍCIO. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.agrosilicio.com.br/produtos.html>>. Acesso em: 17 de out. de 2022.
- ALOVISI, A. M. T. et al. Silicon-phosphorus interactions in soils cultivated with beans plants. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 36, n. 1, p. 79-86, jan./mar., 2014.
- ALOVISI, A. M. T. et al. Uso do pó de rocha basáltica como fertilizante alternativo na cultura da soja. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, 2021.
- ALVES, P. F. S. et al. Pó de rocha como condicionador de solo para o feijoeiro no norte de Minas Gerais. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, 2021.
- AMARH, F. et al. Effects of soil depth and characteristics on phosphorus adsorption isotherms of different land utilization types: Phosphorus adsorption isotherms of soil. **Soil & Tillage Research**, v. 213, 2021.
- ARAÚJO, Adelson Paulo de. Eficiência vegetal de absorção e utilização de fósforo, com especial referência ao feijoeiro. *In*: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 163-212.
- AZEVEDO, W. R. et al. Disponibilidade de fósforo para o arroz inundado sob efeito residual de calcário, gesso e esterco de curral aplicados na cultura do feijão. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 28, p. 995-1004, 2004.
- BASTOS, F. J. de C. et al. Produtividade do feijoeiro sob supressão hídrica e aplicação de osmoprotetores. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, v. 20, n. 8, ago., 2016.
- BELLONI, Ana Laura. **Efeito de fontes e doses de manganês no desenvolvimento do cultivar TAA Bola Cheia de feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2016. 51 p. *Trabalho de Conclusão de Curso* – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2016.
- BLACKSMITH INSTITUTE AND GREEN CROSS. **The world's worst pollution problems: assessing health risks at hazardous waste sites**. 2012. 52 p.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686 p.
- BRAIT, Marny Alexande Hoff. **Interação silício e fósforo na adsorção desses elementos em diferentes solos de Cerrado**. 2008. 98 p. *Dissertação de Mestrado*- Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2008.
- CARVALHO, R. et al. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesqu. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 557-565, mar., 2001.
- CARVALHO, André Mundstock Xavier de. **Rochagem e suas interações no ambiente solo: contribuições para aplicação em agroecossistemas sob manejo agroecológico**. 2012. 116 p. *Dissertação de Doutorado*- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

CARVALHO, Bruno Gabriel de. **Interação entre fósforo, silício e enxofre em um Latossolo e biodisponibilização de fósforo de fontes de baixa solubilidade por processos de compostagem.** 2014. 57 p. *Dissertação de Mestrado*- Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, 2014.

CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Adsorção de fosfato em solos com caráter árido avaliada por um modelo de complexação de superfície. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 21, p. 353-360, 1997.

CASAGRANDE, J.C. et al. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:51-59, 2003.

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.

CESSA, R. M. A. et al. Absorção de fósforo e crescimento do sorgo em função da aplicação de silício e fósforo em Latossolo Vermelho distroférrico. **Rev. De Ciências Agrárias**, p. 135-142, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos.** Brasília, v. 9, safra 2021/22, n. 12, décimo segundo levantamento, set., 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos.** Brasília, v. 10, safra 2022/23, n. 1, primeiro levantamento, out., 2022.

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1231-1237, dez., 2004.

CUNHA, P. C. R. da et al. Manejo da irrigação no feijoeiro cultivado em plantio direto. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, v. 17, n. 7, jul., 2013.

DEUS, A. C. F.; BÜLL, L. T. Eficiência de escórias de siderurgia na cultura do feijoeiro em sistema de semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria, 2013.

EGHBALL, B.; BINFORD, G. D.; BALTENSBERGER, D. D. Phosphorus movement and adsorptions in a soil receiving long-term manure and fertilizer application. **Journal of Environmental Quality**, v. 25, n. 6, p. 1339-1343, 1996.

EHLERS, T.; ARRUDA, G. O. S. F. de. Utilização de pó de basalto em substratos para mudas de *Eucalyptus grandis*. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 1, p. 37-44, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **BRS Estilo: cultivar de grão tipo comercial carioca, com arquitetura de planta ereta associada com alto potencial produtivo.** Santo Antônio de Goiás, dez. 2009.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.
- FALCÃO, N. P. de S.; SILVA, J. R. A. da. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 3, p. 337-342, 2004.
- FALKER AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA LTDA. **Como o índice ICF é calculado?** Disponível em: <<https://www.falker.com.br/base/article/AA-00299/41/Clorofila/clorofiLOG-CFL1030/Como-o-ndice-ICF-calculado.html>>. Acesso em: 11 de out. de 2022.
- FARIAS, D. R de et al. Fósforo em solos representativos do Estado da Paraíba. I – Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p. 623-632, 2009.
- FERNANDES, L. A. et al. Fontes de potássio na produtividade, nutrição mineral e bromatologia do maxixe-do-reino. **Hortic. Bras.**, v. 31, n. 4, out./dez., 2013.
- FINK, J. R. et al. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62-68, jan., 2016.
- FRANCO, M. H. R. et al. Physiological and morphological characteristics of *Phaseolus vulgaris* L. grown in soil with picloram residues. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 46, n. 3, jul./set., 2016.
- FRANDOLOSO, J. F. et al. Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 5, p. 686-694, set. /out., 2010.
- FREIRE, L. R. (ed.) et al. **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: Embrapa; Seropédica: Editora Universidade Rural, 2013. 430 p.
- FREITAS, Fábio de Oliveira. Evidências genético-arqueológicas sobre a origem do feijão-comum no Brasil. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 41, n.7, p. 1199-1203, jul., 2006.
- GLOBALFERT. **Professor Sergio Pavinato, professor da ESALQ, fala sobre a utilização de fertilizantes no cerrado brasileiro e na cana-de-açúcar**. Dez., 2019.
- GLOBALFERT. **3º reporte anual do mercado de fertilizantes**. 2022. 168 p.
- GONZAGA, A. C. de O. (ed.); BARBOSA, F. R. (ed.). Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na Região Central-Brasileira: **2012-2014**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2012. 247 p.
- MACEDO, F. B. et al. Fitorregulador, produção e conteúdos de clorofila nas folhas em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. IAPAR Pérola. **Rev. Ecosistema**, v. 27, n. 1,2, jan./dez., 2002.
- MALAVOLTA, Euripedes. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MANOS, M. G. L. et al. Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro comum na região nordeste brasileira 2013-2014. *In: REUNIÃO DA COMISSÃO TÉCNICA NORTE/NORDESTE BRASILEIRA DE FEIJÃO*, 17, 2012, Aracaju. (**Documentos**)... Aracaju: Embrapa Tabuleiros, 199 p., 2013.

MARTINS, E. de S. et al. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. *In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. Agrominerais para o Brasil*. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2010. cap. 5, p. 89-104.

MATICHENKOV, V. V.; BOCHARNIKOVA, E. A. Chapter 13: the relationship between silicon and soil physical and chemical properties. **Studies in Plant Science**, v. 8, p. 209-219, 2001.

MELO, S. P. de; MONTEIRO, F. A.; MANFREDINI, D. Silicate and phosphate combinations for marandu palisadegrass growing on an oxisol. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 64, n. 3, p. 275-281, mai./jun., 2007.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa Nº 5/2016. Dispõe sobre as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. 2016. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf>>. Acesso em: 17 de out. de 2022.

MOREIRA, F. L. M. et al. Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. **Rev. Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 37, n. 1, p. 7-12, 2006.

MOTTA, A. C. V. (coord.); PAULETTI, V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2 ed. Curitiba: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. 289 p.

NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1007 p.

NUTRIÇÃO DE PLANTAS, CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Fertilizantes**. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706116307595>>. Acesso em: 13 de out. de 2022.

NZIGUHEBA, G. et al. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. **Plant and Soil**, v. 198, p. 159-168, 1998.

OLIVEIRA, I. P. de et al. Magnesium sulfate and the development of the common bean cultivated in an Ultisol of Northeast Australia. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 57, n. 1, mar., 2000.

OLIVEIRA, Lilian Aparecida de. Silício em plantas de feijão e arroz: **absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio**. 2009. 157 p. *Dissertação de Doutorado* - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

OLIVEIRA, T. C. de et al. Eficiência e resposta à aplicação de fósforo em feijão comum em solos de Cerrado. **Rev. Verde**, Mossoró, v. 7, n. 1, p. 16-24, jan./mar., 2012.

OLIVEIRA, V. C. de et al. Avaliação de clorofila e fotossíntese em plantas de espinafre. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35, 2015, Natal. **Anais** [...]. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

OLIVEIRA, M. G. de C. **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos**. Brasília: Embrapa, 2018. 59 p.

PÁDUA, Eduane José de. **Rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas**. 2012. 91 p. *Dissertação de Mestrado* - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

PAVINATO, Paulo Sérgio. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. 2007. 158 p. *Tese de Doutorado*- Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

PAVINATO, P. S. et al. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 15615, 2020.

PRATES, F. B. de S. et al. Crescimento de mudas de maracujazeiro-amarelo em resposta à adubação com superfosfato simples e pó de rocha. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 2, p. 239-246, mar./abr., 2010.

RAIJ, Bernardo van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, Ceres, 1991. 343p.

RAIJ, Bernardo van et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2 ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997.

RAIJ, Bernardo van et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. 285 p.

RAIJ, Bernardo van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420 p.

ROSA, S.L.K et al. **Determinação dos atributos físico-hídricos de três tipos de solos dos Campos Gerais**. Disponível em: <<https://maissoja.com.br/determinacao-dos-atributos-fisico-hidricos-de-tres-tipos-de-solos-dos-campos-gerais/>>. Acesso em: 10 de out. de 2022.

ROSOLEM, C.; MARUBAYASHI, O. M. A. Seja o doutor do seu feijoeiro. **Arquivo do Agrônomo**, n. 7, dez., 1994.

SALGADO, F. H. M. et al. Eficiência de genótipos de feijoeiro em resposta à adubação nitrogenada. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 42, n. 4, p. 368-374, out./dez., 2012.

SANDIM, A. da S. et al. Phosphorus availability in oxidic soils treated with lime and silicate applications. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 38, p. 1215-1222, 2014.

- SANTOS, J. Z. L. et al. Resposta do feijoeiro à adubação fosfatada em solos de Cerrado com diferentes históricos de uso. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 35, p. 193-202, 2011.
- SANTOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.
- SANTOS, L. C. dos et al. O papel do silício nas plantas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, 2021.
- SILVA, H. T. de.; COSTA, A. O. **Caracterização botânica de espécies silvestres do gênero *Phaseolus* L. (Leguminosae)**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 40 p.
- SILVA, C. C. da.; PELOSO, J. D. Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro comum na região central-brasileira 2005-2007. *In*: REUNIÃO DA COMISSÃO TÉCNICA CENTRAL-BRASILEIRA DE FEIJÃO, 16, 2005, Santo Antônio de Goiás. **(Documentos)...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 139 p., 2006.
- SILVA, O. F.; WANDER, A. E. O feijão-comum no Brasil: **passado, presente e futuro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2013.
- SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C. Adsorção e modelos. *In*: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 71-201.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre, 2004. 400 p.
- SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. **Informações Agronômicas**, n. 102, jun., 2003.
- SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.
- SOUZA, R. F. de et al. Nutrição fosfatada e rendimento do feijoeiro sob influência da calagem e adubação orgânica. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 30, n. 4, p. 656-664, jul./ago., 2006.
- SOUZA, R. F. de et al. Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. **Rev. Bras. Ci. Solo.**, v. 31, n. 1, p. 1535-1544, 2007.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 1.ed., New York, Oxford University, 1989. 277p.
- TOLEDO, M. Z. et al. Seed germination and seedling development of white oat affected by silicon and phosphorus fertilization. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 68, n. 1, p. 18-23, jan./fev., 2011.
- TORRES, W. G. A. et al. Phosphorus availability in soil amended with biochar from rice rusk and cattle manure and cultivated with common bean. **Ciência e Tecnologia**, v. 44, 2020.

- TOSCANI, R. G. da S.; CAMPOS, J. E. G. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos intensamente intemperizados. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 259-274, 2017.
- VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. dos. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p. 111-118, 2003.
- VIEIRA, N. M. B. **Crescimento e marcha de absorção de nutrientes no feijoeiro cvs. BRS-MG Talismã e Ouro Negro, em plantio direto e convencional**. 2006. 160 p. *Dissertação de Mestrado* – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- VIERA, M. da S. et al. Phosphorus sorption isotherms in soils of the semiarid region of Brazil. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 34, n. 1, p. 166-176, jan./ mar., 2021.
- WELTER, M. K. et al. Efeito da aplicação de pó de basalto no desenvolvimento inicial de mudas de camu-camu (*Myrciaria dubia*). **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 33, n. 3, p. 922-931, set., 2011.
- YAN, X. et al. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources. **Geoderma**, v. 295, p. 80-85, jun., 2017.
- YANG, X.; CHEN, X.; YANG, X. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 85-91, abr., 2019.
- ZUCARELI, C. Fósforo na produtividade e qualidade de sementes de feijão carioca precoce cultivado no período das águas. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 42, n. 1, mar., 2011.
- ZWIRTES, A. L. et al. Caracterização físico-hídrica de solos submetidos a diferentes manejos. **Rev. Bras. De Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 4, n. 3, p. 51-66, 2011.