



FABRÍCIO TEIXEIRA DE LIMA GOMES

**PRODUÇÃO DO ARROZ DE TERRAS ALTAS EM FUNÇÃO
DA INTERAÇÃO FÓSFORO E SILÍCIO**

LAVRAS – MG

2021

FABRÍCIO TEIXEIRA DE LIMA GOMES

**PRODUÇÃO DO ARROZ DE TERRAS ALTAS EM FUNÇÃO DA INTERAÇÃO
FÓSFORO E SILÍCIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Agronomia, para a
obtenção do título de Bacharel.

Profa. Dra. Maria Ligia de Souza Silva
Orientadora

Dr. Franklin Eduardo Melo Santiago
Coorientador

LAVRAS – MG

2021

FABRÍCIO TEIXEIRA DE LIMA GOMES

**PRODUÇÃO DO ARROZ DE TERRAS ALTAS EM FUNÇÃO DA INTERAÇÃO
FÓSFORO E SILÍCIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Agronomia, para a
obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 04 de maio de 2021.

Dr. Franklin Eduardo Melo Santiago	IFPI
Eng. Agr. Amanda Santana Chales	UFLA
MsC. Arnon Afonso de Souza Cardoso	UFLA

Profa. Dra. Maria Ligia de Souza Silva
Orientadora

LAVRAS – MG

2021

*Aos meus pais, Benvindo e Ada Meire, que com muito carinho estiveram ao meu lado, não medindo esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida;
A todos os professores que me acompanharam até este momento.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Benvindo e Ada Meire, por todo amor concedido, por sempre acreditarem em mim e pelo estímulo de lutar por um futuro melhor.

Aos meus avós, Luís e Fátima, por todas as orações e pelo amor incondicional.

À minha irmã, Cristiane, pelo cuidado, companheirismo e apoio durante essa caminhada.

À minha prima e amiga, Marcilene, pelos conselhos, pelo carinho e por estar ao meu lado em todos os momentos.

À professora Maria Ligia, pela orientação, pela confiança, compreensão, conhecimento e por todo apoio que me foi dado ao longo da graduação.

Ao Franklin, pelo conhecimento, incentivo, conselhos e contribuições.

A todos os amigos, pelo apoio e por serem a minha família: Amanda, Ana Flávia, Ana Luísa, Ana Luíza, Juliana, Júlio, Letícia, Lívia, Marianna, Moniky, Patrick e Vinícius. Amo vocês!

A todos os colegas do DCS pelas contribuições e momentos compartilhados: Aline, Anderson, Arnon.

À Universidade Federal de Lavras pelo ensino de excelência, ética e por proporcionar toda a estrutura e suporte para a realização da pesquisa.

Ao Programa de Iniciação Científica da UFLA (PIBIC/UFLA) pela concessão da bolsa.

Às FAPEMIG, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro.

Enfim, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

Obrigado!

RESUMO

A deficiência de fósforo (P) é considerada um dos fatores limitantes ao crescimento vegetal em solos tropicais, devido à forte adsorção aos óxidos presentes no solo. Desta forma, a utilização de ânions competidores, a exemplo do silicato, com o fosfato pelos sítios de adsorção no solo, apresenta-se como uma estratégia para o aumento da eficiência da adubação fosfatada. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da interação P e Si na produção de grãos e no crescimento do arroz de terras altas. O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, em Lavras - MG. Foram utilizados dois tipos de solos com texturas contrastantes, um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), textura argilosa, e um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura média. A parcela experimental foi composta por um vaso com 4 dm³ de solo e duas plantas de arroz (*Oryza sativa* L.), cultivar BRS Pepita. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 2 x 5, sendo duas doses de P (200 e 300; 260 e 390 mg dm⁻³, respectivamente para o LVA e LVdf), aplicado na forma de superfosfato triplo, e cinco doses de Si (0, 150, 300, 450 e 600 mg dm⁻³), tendo como fonte o produto Agri Sil®, com 98% de SiO₂ e 6,5% de Si solúvel, e três repetições por tratamento. Ao final do experimento foi avaliado a concentração de P e Si na parte aérea, a produção de grãos por vaso, o número de grãos por panícula (NGP) e a altura de plantas. No LVA, a dose de 365 mg.dm⁻³ de Si e 200 mg.dm⁻³ de P apresentaram melhores resultados para concentração de P e Si, produção de grãos, NPG e altura de plantas. A concentração de P foi maior com a aplicação de 300 mg.dm⁻³ de P. No LVdf, a dose de 270 mg.dm⁻³ de Si aumentou a produção e o NGP. A dose de 260 mg.dm⁻³ de P apresentou maior concentração de Si, maior produção, NGP e altura de plantas. A aplicação de Si não influenciou na concentração de P e na altura de plantas.

Palavras-chave: Nutrição de plantas. Adubação fosfatada. Silício.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	08
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1 Cultura do arroz.....	10
2.2 Fósforo no solo.....	11
2.3 Fósforo na planta.....	12
2.4 Silício no solo e seu efeito benéfico para as plantas.....	13
2.5 Interação P e Si.....	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
3.1 Condições de cultivo.....	16
3.2 Delineamento experimental.....	17
3.3 Condução do experimento.....	17
3.4 Colheita do experimento.....	17
3.5 Determinação de P e Si.....	18
3.6 Análise estatística.....	18
4. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	19
4.1 Concentração de Si e P.....	19
4.2 Produção de grãos, número de grãos por panícula e altura de plantas.....	21
5. CONCLUSÃO.....	24
6. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	25

1. INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma das espécies mais cultivadas no mundo, constituindo uma das principais fontes de energia, além de ser fonte de proteínas, minerais e vitaminas do complexo B. Os países asiáticos consomem 50% do arroz produzido no mundo, no entanto, o arroz também faz parte da dieta dos países em desenvolvimento, sendo um alimento básico de mais da metade da população mundial (FAO, 2018; LIMA et al., 2019).

No Brasil a cultura do arroz se adaptou a diversos sistemas de produção, sendo cultivado em todas as regiões do país. No entanto, a maior parte da produção provém do arroz inundado, com cerca de 92% do total de arroz produzido, enquanto o arroz de terras altas contribui com apenas 8% da produção devido à sua baixa produtividade (CONAB, 2020). A baixa produtividade do arroz de terras altas é atribuída a estresses bióticos e abióticos, além no manejo inadequado da cultura empregado pelos produtores nesse sistema de produção (HEINEMANN et al., 2009; SAITO et al., 2018).

O manejo da fertilidade do solo associada a nutrição de plantas, são aspectos de fundamental importância para o adequado desenvolvimento das culturas, assim como o alcance de uma boa produtividade. Dessa forma, tendo em vista a dinâmica dos nutrientes no solo e nas plantas, a deficiência nutricional em função do fornecimento inadequado dos nutrientes constitui um fator limitante para a produção agrícola.

O fósforo (P) é essencial ao metabolismo das plantas, atuando no transporte de energia na célula, na fotossíntese e na respiração, fazendo parte dos ácidos nucleicos, fosfolípidos, fosfoproteínas e coenzimas (MELO; MENDONÇA, 2019). Entretanto, na maioria dos solos tropicais, o P é um fator limitante a produção vegetal em função dos baixos teores naturais e das altas taxas de imobilização no solo (PINTO et al., 2020).

A complexa dinâmica do P com a fração coloidal do solo devido a sua rápida fixação aos óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), requer a aplicação de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados (RODRIGUES et al., 2016). No entanto, considerando que as reservas de rochas fosfáticas são um recurso natural finito e está relacionada diretamente com a segurança alimentar global, uma vez que 90% da demanda mundial deste elemento é destinada para a produção de fertilizantes (RYAN et al., 2012; CORDELL; WHITE, 2014; WELLMER; SCHOLZ, 2017), faz-se necessário a avaliação de estratégias para aumentar a eficiência da adubação fosfatada.

O silício (Si) embora não seja um nutriente para as plantas é considerado um elemento benéfico para o crescimento e o desenvolvimento vegetal (HASANUZZAMAN et al., 2018).

O Si confere proteção as plantas contra estresses abióticos e bióticos como tolerância ao ataque de pragas e fitopatógenos, amenização dos efeitos de excesso de metais pesados e tolerância ao estresse salino e hídrico (MENEGALE et al., 2015). Segundo Oliveira (2009), em plantas de arroz, a aplicação de Si proporciona maior eficiência fotossintética, aumenta a resistência contra o ataque de fungos e insetos, reduz o estresse hídrico e aumenta a produtividade da cultura.

Em função da similaridade química entre as duas formas aniônicas de P (H_2PO_4^-) e Si (H_3SiO_4^-), dependendo da concentração de Si no solo, este pode competir com o fosfato pelos sítios de adsorção da fase sólida, tornando o P mais disponível para as plantas. (MCKEAGUE; CLINE, 1963; HINGSTON et al., 1972; MA et al., 2001).

A maior dessorção de P em função da aplicação de Si já foi observada em algumas culturas, tais como eucalipto (CARVALHO et al., 2000, 2001) e milho (OWINO-GERROH; GASCHO, 2005). Kostic et al. (2017) verificaram melhoria na absorção de P pelo trigo em função da aplicação de Si, principalmente pela regulação positiva do gene transportador do P. Entretanto, Hu et al (2018) observaram que o Si diminui a absorção de P no arroz pela regulação negativa do gene transportador do P. Dessa forma, faz-se necessário estudos para a melhor compreensão da interação desses elementos no sistema solo-planta.

Tendo em vista a necessidade de aumentar a produtividade do arroz de terras altas e a baixa disponibilidade do P nos solos brasisleiros, a aplicação de Si pode ser uma alternativa para aumentar a concentração do P disponível para as plantas, além dos efeitos benéficos da absorção do Si pela cultura do arroz. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da interação P e Si na produção de grãos e no crescimento do arroz de terras altas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura do arroz

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma gramínea anual pertencente à família *Poaceae*, amplamente cultivado no mundo, com grande importância econômica e social. Constitui um dos alimentos base da alimentação humana, sendo considerado a principal fonte para erradicar a fome no mundo, além disso, pode fornecer 20% de energia e 10% de proteína *per capita* necessária ao homem (BORÉM; RANGEL, 2015).

Segundo a FAO (2019), o arroz é cultivado em todos os continentes, com exceção da Antártida, ocupando 23% da área total cultivada com cereais no mundo, o que representa mais de 167 milhões de hectares e cerca de 769 milhões de toneladas produzidas anualmente.

No Brasil a cultura do arroz se adaptou a diversos sistemas de produção, sendo cultivado em todas as regiões do país. No ecossistema de várzea, o cultivo pode ser realizado com ou sem irrigação por inundação, enquanto o arroz de terras altas, a cultura pode ser conduzida sem irrigação, dessa forma a água utilizada é proveniente da precipitação ou irrigação suplementar (COLTRO et al., 2017).

Sua produção ocorre principalmente na região Sul do país, correspondendo a aproximadamente 82,5% da produção nacional. A maior parte da produção provém do arroz inundado, com cerca de 92% do total de arroz produzido. Já o arroz de terras altas, apesar de representar 22% da área total cultivada, contribui com apenas 8% da produção devido à sua baixa produtividade, com 2.468 kg ha⁻¹ na safra 2019/20 (CONAB, 2020).

Na década de 1970 e 1980 o arroz de terras altas teve grande importância na exploração de novas áreas na região do cerrado brasileiro. A cultura era utilizada em aberturas de áreas que apresentavam solos ácidos e de baixa fertilidade, sendo substituída posteriormente por pastagens ou culturas com maior retorno econômico, dessa forma, o sistema de produção do arroz de terras altas foi caracterizado como uma atividade de baixo custo, alto risco climático e baixo retorno econômico (PINHEIRO et al., 2006).

No entanto, a baixa produtividade do arroz de terras altas é atribuída a estresses bióticos e abióticos, além no manejo inadequado da cultura empregado pelos produtores nesse sistema de produção (HEINEMANN et al., 2009; SAITO et al., 2018). Dessa forma, a adubação fosfatada associada aos benefícios da aplicação de Si podem contribuir significativamente para aumentar produtividade do arroz de terras altas.

2.2 Fósforo no solo

O P foi descoberto em 1669 por Hennig Brand, sendo o décimo elemento mais abundante do planeta (HUMINICKI; HAWTHORNE, 2002). No entanto, apenas em 1840, quando Liebig descobriu que o P era nutriente das plantas, foi que se passou a empregá-lo em fertilizantes minerais (CORDELL; WHITE, 2011).

A fonte de P mais comum é a apatita, formado por processos ígneos ou sedimentares, contendo cerca de 13 a 17% de fósforo. No entanto, estes minerais apresentam alta insolubilidade em água e o P neles contido não está prontamente disponível para as plantas, sendo dependente da ação do intemperismo para que o P estrutural ou dos minerais primários seja disponibilizado ao ambiente (STEVENSON; COLE, 1999; DESMIDT et al., 201; UYGUR et al., 2017).

No solo, o P pode ser encontrado nas formas inorgânicas (Pi) e orgânicas (Po). O grupo do Pi é constituído principalmente por íons fosfato, encontrados na solução do solo como H_2PO_4^- ou HPO_4^{2-} ou PO_4^{3-} . A proporção relativa desses ânions na solução do solo é dependente do pH, onde em condições de acidez, ocorre o predomínio de íons H_2PO_4^- e, em solos alcalinos, ocorre predominância dos íons HPO_4^{2-} e PO_4^{3-} . Em solos ácidos ocorrem reações de precipitação do fosfato com alumínio (Al), ferro (Fe), manganês (Mn) e cálcio (Ca) ou adsorção aos oxi-hidróxidos de Fe e Al e minerais da fração argila ((FUENTES et al., 2008; MILIĆ et al., 2019).

Nos solos tropicais, devido a sua grande capacidade de retenção de P, faz-se necessário a aplicação de uma elevada quantidade de adubação fosfatada, superiores a necessidade da cultura, uma vez que se torna necessário suprir a exigência do solo, saturando os componentes responsáveis pela imobilização do P (FURTINI NETO et al., 2001).

Com o crescente aumento nos custos de fertilizantes e a redução de reservas de rochas fosfáticas, o uso eficiente deste recurso não renovável, é um aspecto de suma importância, uma vez que a fertilização fosfatada é essencial para manter ou aumentar a produtividade das culturas (CORDELL et al., 2009; CONDRON; NEWMAN, 2011; ELSER et al., 2014; JOHNSTON et al., 2014).

Dessa forma, além da calagem, que atualmente é amplamente difundida no Brasil, são necessárias estratégias para reduzir a retenção de P no solo e fazer um melhor uso dos recursos finitos de rochas fosfáticas, avançando em direção a uma produção agrícola mais sustentável. Nesse sentido, a aplicação de Si pode ser uma alternativa para aumentar a disponibilidade de P par as plantas nos solos brasileiros.

2.3 Fósforo na planta

O P é considerado essencial para as plantas, sendo um dos macronutrientes limitantes ao crescimento, desenvolvimento e a produtividade das culturas. Suas funções estão associadas a fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão celular, entre outras (VENTIMIGLIA et al., 1999).

A concentração de P nos tecidos vegetais é consideravelmente menor quando comparada com o nitrogênio (N) e potássio (K), variando entre 0,1 e 0,5%. O elemento pode ser absorvido pelas plantas na forma de dihidrogenofosfato (H_2PO_4^-) ou hidrogenofosfato (HPO_4^{2-}), dependendo do pH do solo (STEVENSON; COLE, 1999). O P é absorvido por intermédio de um transportador $\text{H}^+ - \text{HPO}_4^{2-}$ do tipo simporte, sendo incorporado em compostos orgânicos como açúcares fosfatos, fosfolipídios e nucleotídeos (TAIZ; ZEIGER, 2006).

O elemento é considerado móvel na planta, dessa forma ocorre a translocação dos tecidos mais velhos para os mais novos. Por isso, a deficiência pode ser observada inicialmente nas folhas mais velhas (TAIZ; ZEIGER, 2006).

A deficiência de P reduz a taxa de crescimento das plantas e, no caso das gramíneas, as folhas adquirem coloração arroxeadas devido ao acúmulo de açúcares que estimula a síntese de antocianinas. O sintoma inicia-se no ápice foliar e progride ao longo da margem da folha até que esta fique totalmente roxa, e posteriormente ocorre um necrose do tecido foliar (FERREIRA, 2012).

Silva (1996) estudou os efeitos do suprimento de fósforo na produção de *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria brizantha*, e observou que a aplicação de P aumentou o número de perfilhos, a produção de massa seca e a concentração de P nas folhas para ambas as espécies.

Na cana de açúcar a deficiência de P reflete diretamente no rendimento dos colmos, na qualidade tecnológica e na longevidade do cultivo (FRANCO et al., 2007).

Lima et al. (2020) verificaram que em solo com disponibilidade adequada de P, não há incremento em produtividade pela aplicação de fósforo. Porém, em solo deficiente, a fertilização do o nutriente incrementa em 21% a produtividade de grãos do arroz irrigado.

Similarmente, Reis et al. (2018) verificaram que a aplicação de P sob condição de baixa fertilidade afeta a nutrição da cultura do arroz de forma geral, como a capacidade de perfilhamento, componentes da produtividade e rendimento de grãos. No entanto, não foi observado efeito da aplicação de P em área de alta fertilidade.

Dentre os macronutrientes, o P é o menos exigido pela cultura do arroz, no entanto, é o que apresenta maior exportação no produto colhido (FORNASIERI; FORNASIERI FILHO.,

1993). Dessa forma, devido a sua baixa disponibilidade nos solos brasileiros, a adubação fosfatada é essencial para o adequado desenvolvimento da cultura.

2.4 Silício no solo e seu efeito benéfico para as plantas

O Si não é considerado um elemento essencial para as plantas, pois não atende aos critérios diretos e indiretos de essencialidade (JONES; HANDRECK.; 1967). No entanto, é considerado um elemento benéfico, conferindo proteção as plantas contra estresses abióticos e bióticos como toxidez por metais pesados, ataque de pragas e fitopatógenos, déficit hídrico e salinidade (FRANÇA et al., 2018; AHMED et al., 2019; CHEN et al., 2019; HAWERROTH et al., 2019; KOLLÁROVÁ et al., 2019; NEVES et al., 2019; ZHU et al., 2019).

O Si é componente de minerais primários como feldspatos, augita, quartzo e mica; e minerais secundários, como a caulinita, montmorilonita, illita e clorita (RAIJ, 1991). A concentração de Si na solução do solo é controlada pela solubilidade dos minerais primários e secundários. Os principais fatores que influenciam na solubilidade dos minerais são a temperatura, tamanho de partícula, composição química, pH, potencial redutor, reações de adsorção e dessorção com colóides do solo, lixiviação de Si solúvel e absorção de Si pelas plantas e microrganismos (HAYNES, 2017).

A absorção do Si pelas plantas ocorre por processo passivo, por fluxo de massa ou difusão e processo ativo, por meio de transportadores de membrana específicos (MA et al., 2006). O Si é absorvido na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), sendo transportado até a parte aérea através do xilema e depositado principalmente nas células da epiderme das folhas, na forma de sílica amorfa ($SiO_2.nH_2O$). Dessa forma, como a transpiração é o principal responsável pelo transporte e deposição de Si, a duração do crescimento das plantas desempenha um papel importante no teor de Si (MA; YAMAJI, 2006; HAYNES, 2017).

As plantas de acordo com sua capacidade em absorver e acumular Si são classificadas em acumuladoras, quando possuem mais de 1% de Si em seus tecidos, como o arroz; acumuladoras intermediárias, quando possuem teores entre 0,5 e 1%, como a soja e cucurbitáceas; e não acumuladoras, aquelas que possuem menos de 0,5% de concentração de Si (MA. et al., 2011).

Alguns estudos demonstram o efeito benéfico do Si para a cultura do arroz, tais como aumento do número de folhas, massa seca de plantas e número de espiguetas por panícula, melhor formação e qualidade da casca dos grãos, maior altura de plantas e maior teor e acúmulo

na parte aérea da planta (LOPES, 1997, KORNDÖRFER et al., 1999, GONG et al., 2003, BITTENCOURT et al., 2004, TOKURA et al., 2007).

Segundo Freitas et al. (2015), a aplicação de Si aumenta o teor de silício na planta e no solo e diminui o teor de Al na parte aérea de plantas de arroz de terras altas.

Deus et al. (2019), observaram efeito benéfico do Si no alívio da deficiência de N na cultura do arroz, onde puderam constatar que a mitigação do estresse pela aplicação de Si foi diretamente refletida no aumento da biomassa seca e no rendimento dos grãos.

2.5 Interação P e Si

O fósforo e o silício apresentam uma similaridade química, relacionada a suas formas aniônicas, sendo H_2PO_4^- e o H_3SiO_4^- , proporcionando uma competição pelos mesmos sítios de adsorção no solo, de maneira que o Si pode deslocar (dessorver) o fosfato, ou ser deslocado por ele, da fase sólida para a líquida, tornando-os mais disponíveis (HINGSTON et al., 1972; LEITE, 1997).

A primeira informação sobre o efeito da interação P e Si foi resultante de um experimento de campo de longo prazo conduzido na Rothamsted Experimental Station (Reino Unido). Nesse estudo pode-se constatar que na ausência de fertilização com P, o rendimento da cevada de um campo fertilizado com Si foi maior do que no campo sem adição de Si (FISHER, 1929).

O suprimento de silício na solução nutritiva aumentou o crescimento da parte aérea do arroz mais em um nível de P baixo do que quando a solução apresentava um nível de P intermediário (OKUDA; TAKAHASHI; 1962; MA; TAKAHASHI, 1990). Por outro lado, o Si também apresentou efeitos benéficos no crescimento do arroz quando o nível de P na solução era alto (MA; TAKAHASHI., 1989).

Owino-Gerroh e Gascho (2005) observaram uma redução na sorção de fósforo no solo com a aplicação de Si solúvel. Esse resultado é atribuído ao aumento do pH do solo. O silicato aplicado foi convertido em ácido silícico amorfo (H_4SiO_3). Em baixo pH do solo, a carga negativa da superfície do H_4SiO_3 é menor do que a carga negativa da superfície do ânion fosfato. Portanto, o P é preferencialmente adsorvido nos sítios de ligação do solo. O silicato aplicado aumentou o peso do milho, provavelmente devido ao aumento do pH do solo, tornando o P mais disponível, aumentando a absorção e utilização do P pela planta.

Kostik et al., (2017) estudando o papel do Si na mitigação da deficiência de P em trigo de cultivado em solo com baixo teor de P demonstraram o efeito direto da aplicação de Si na melhora da absorção e, conseqüentemente, no crescimento da planta. O efeito indireto do

silicato de sódio (Na_2SiO_3) aplicado no alívio de pH baixo e toxidez por Al_3^+ foi comparável ao efeito da calagem. No entanto, o efeito da adição de Si na regulação positiva da expressão de genes transportadores de Pi foi várias vezes maior e a absorção de P dobrou em comparação com a aplicação de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Hu et al., (2018) estudaram o mecanismo subjacente à diminuição induzida por Si na absorção de P no arroz com suprimento adequado e alto de P em solução nutritiva. Os resultados indicaram que o Si é capaz de reduzir efetivamente a concentração de P no grão de arroz. Segundo os autores, o Si diminui a absorção de P no arroz pela regulação negativa do gene transportador de Pi, OsPT6, nas raízes, e o Si acumulado na parte aérea é necessário para esta regulação negativa.

Em função da importância da adubação fosfatada para as plantas, diversos estudos vêm sendo realizados visando compreender a interação P e Si e seu efeito no sistema solo – planta, a fim de aumentar a eficiência do manejo da fertilidade do solo relacionada a adubação fosfatada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Condições de cultivo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), localizada no município de Lavras – MG (21° 14'43" S, 44° 59' 59" W, altitude de 919 m). As médias de temperatura e umidade no interior do ambiente durante o período experimental foram de 25°C e 60%, respectivamente.

Foram utilizados dois tipos de solos com texturas contrastantes, um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), textura argilosa, e um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura média (EMBRAPA., 2013).

Os solos foram coletados na camada de 0 - 20 cm de profundidade, secos ao ar, peneirados em malha de 4 mm e acondicionados em vasos plásticos com capacidade de 4dm³. Posteriormente, subamostras foram tomadas para caracterização física e química (SILVA, 2009), a qual apresentou os seguintes resultados (Tabela 1):

Tabela 1. Características química e física de amostras do Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), na profundidade de 0 a 20 cm.

Solo	pH	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	t	T	SB	V	m	
		mg dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----								---- % ----	
LVdf	5,0	54,0	1,5	0,2	0,4	6,3	2,2	8,1	1,8	22,5	17,8	
LVA	4,9	26,0	0,3	0,1	0,3	2,0	0,7	2,5	0,4	18,3	38,9	
	P	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	MO	Areia	Silte	Argila	
			----- mg dm ⁻³ -----							----- dag kg ⁻¹ -----		
LVdf	1,1	11,6	0,3	2,5	28,0	17,5	0,3	2,8	16	15	69	
LVA	0,3	7,0	0,2	0,6	12,0	1,2	1,3	0,5	66	2	66	

pH (água); Ca, Mg e Al (KCl 1mol L⁻¹); P, K, Fe, Zn, Mn e Cu (Mehlich 1); Acidez potencial (SMP); Matéria orgânica (Na₂Cr₂O₇ 4 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 5 mol L⁻¹) de acordo com metodologia de Silva (2009). Areia, silte e argila (Bouyoucos) modificado por Carvalho (1985).

Foi utilizada a cultivar BRS Pepita, que possui ciclo precoce, arquitetura intermediária, perfilhamento moderado, resistência moderada ao acamamento e grão tipo longo fino (BRESEGHELLO., et al., 2007).

3.2 Delineamento Experimental

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 2 x 5, com três repetições. Os tratamentos consistiram em duas doses de P (200 e 300; 260 e 390 mg dm⁻³, respectivamente para o LVA e LVdf), aplicado na forma de superfosfato triplo, e cinco doses de Si (0, 150, 300, 450 e 600 mg dm⁻³), tendo como fonte o produto Agri Sil® que apresenta concentração de 98% de SiO₂ e 6,5% de Si solúvel. As doses foram estabelecidas de acordo com ensaio realizado previamente visando avaliar a capacidade de adsorção de P nos solos estudados.

3.3 Condução do Experimento

Com base na análise química do solo, foi efetuada a calagem para elevar a saturação por bases a 50%, aplicando calcário calcinado com 24,9% Ca, 8,4% Mg e PRNT de 94,5% e em seguida incubado por 30 dias com umidade a 60% do volume total de poros.

A adubação de plantio foi constituída dos tratamentos e da aplicação de 50 mg dm⁻³ de N, na forma de uréia, e 100 mg dm⁻³ de K, na forma de cloreto de potássio. Além da aplicação de solução com micronutrientes: 1,0 de B, 3,0 de Zn, 1,0 de Cu, 0,5 de Fe, 3,0 de Mn e 0,4 de Mo, em mg dm⁻³, utilizando como fonte os reagentes P.A.: H₃BO₃, CuSO₄, ZnSO₄.7H₂O, MnSO₄.2H₂O, FeSO₄.7H₂O, (NH₄)₆Mo₇O₂₄.

Em cada parcela experimental foram semeadas cinco sementes por vaso e dez dias após a emergência realizou-se o desbaste, deixando duas plantas por vaso. Aos 30 dias após a emergência, no início do estágio de perfilhamento, foi realizado a adubação de cobertura com N na dose de 50 mg dm⁻³ e com K na dose de 50 mg dm⁻³. A umidade do solo foi mantida a 60% da capacidade de campo, monitorada por meio de passagens diárias do conjunto vaso-solo-plantas repondo-se o volume evapotranspirado com água deionizada.

3.4 Colheita do experimento

A colheita das plantas foi realizada no final do ciclo, aos 96 dias após a semeadura. As plantas foram separadas em parte aérea e panículas. A parte aérea foi seca ao ar e armazenadas em sacos de papel para posterior secagem em estufa com circulação de ar forçada a 65°C por 72h. Em seguida, o conteúdo dos sacos foi moído em moinho do tipo Willey, com peneira de malha de 1 mm e submetido para determinação dos teores de P e Si.

As panículas foram armazenadas em sacos de papel, secas em estufa com circulação de ar forçada a 65°C por 72h e posteriormente os grãos foram debulhados e pesados para determinação da produção de grãos (g vaso^{-1}).

A altura das plantas (cm) foi obtida pela média da altura de cinco perfilhos em cada parcela, aferida com trena da base da planta a ápice da panícula.

O número de grãos por panícula (NGP) foi obtido pela contagem do número médio de grãos de cinco panículas por parcela.

3.5 Determinação de P e Si

A matéria seca da parte aérea foi submetida à digestão nitroperclórica. O teor de P foi determinada por espectrofotometria de acordo com Silva (2009). Já para o teor de Si, foi realizada digestão com peróxido de hidrogênio (H_2O_2), através do método amarelo descrito por Korndörfer et al. (2004).

3.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância ($p \leq 0,05$), regressão polinomial e os valores médios foram comparados pelo teste Scott-Knott, utilizando o programa estatístico R 3.2.3 (RDCT, 2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Concentração de Si e P

A concentração de Si no LVA foi influenciada significativamente pela interação P e Si ($p < 0,05$). Com a aplicação de 200 mg dm⁻³ de P a equação apresentou ajuste quadrático, com ponto de máxima (9,84 mg kg⁻¹ de Si) na dose de 330 mg dm⁻³ de Si (Figura 1A). No LVdf a concentração de Si apresentou efeito isolado para os fatores em estudo ($p < 0,05$). Houve uma redução na concentração de Si a medida que doses crescentes do elemento foram aplicadas no solo (Figura 1B). A redução na concentração de Si, se deve, possivelmente, a competição do Si na absorção com o P, em condições de maior disponibilidade de fósforo. A dose de 260 mg dm⁻³ de P promoveu um teor de 10 mg kg⁻¹ de Si na parte aérea, valor 12,6% maior quando comparado a dose de 390 mg dm⁻³ de P (Tabela 2).

Figura 1. Concentração de Si em plantas de arroz em função da interação P e Si nos solos LVA (a) e LVdf (b). As barras de erro indicam o erro padrão da média (n = 3).

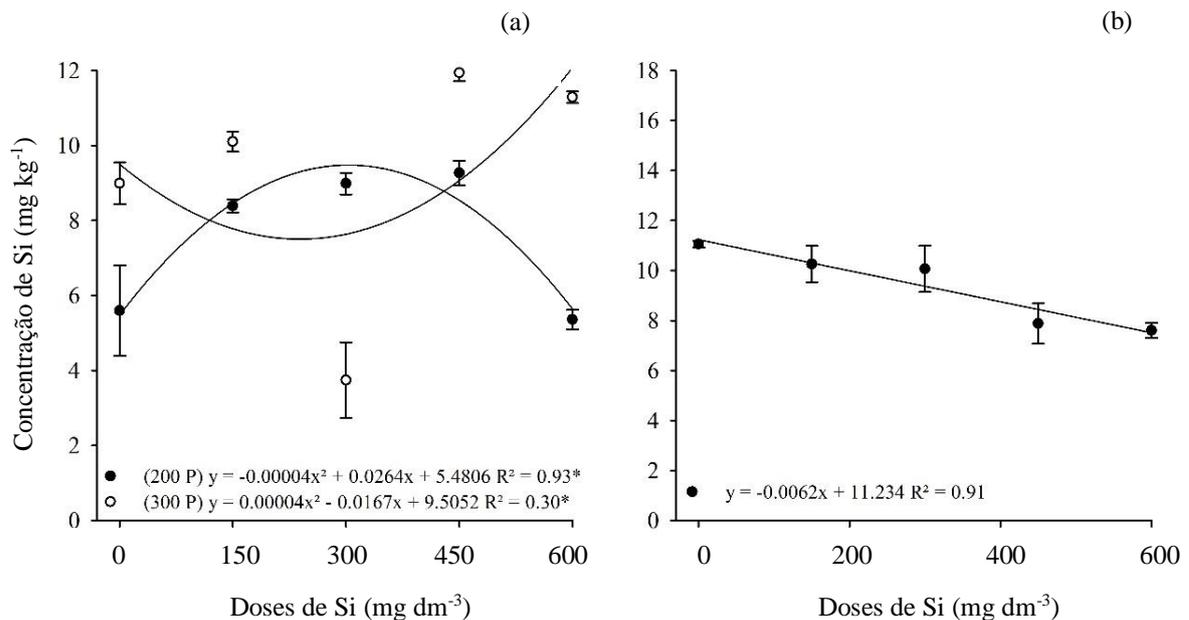


Tabela 2. Concentração de Si em plantas de arroz em função das doses de P aplicadas no solo LVdf.

Doses de P (mg dm ⁻³)	Concentração de Si (mg kg ⁻¹)
260	10.00±0.88a
390	8.74±0.63b

Médias seguidas da mesma letra não diferem ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

A concentração de fósforo no LVA apresentou efeito isolado para os fatores em estudo ($p < 0,05$). A equação apresentou ajuste quadrático em função das doses de Si, com ponto de máxima de $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ de P na dose 300 mg dm^{-3} de Si (Figura 2). Em relação as doses de P, a maior concentração do elemento ($1,74 \text{ g kg}^{-1}$ de P) foi obtida com a aplicação de 300 mg dm^{-3} de P (Tabela 3). Um estudo visando avaliar o papel do Si na mitigação da deficiência de P em trigo cultivado em solo com baixo teor do nutriente, demonstrou o efeito direto da aplicação de Si na melhoria da absorção de P pelas plantas (KOSTIK et al., 2017). No LVdf, a concentração de P foi influenciado somente pelas doses de P, com teor de $1,27 \text{ g kg}^{-1}$ de P na dose de 390 mg dm^{-3} de P, valor 20,5% superior quando comparado a aplicação de 260 mg dm^{-3} de P (Tabela 3).

Figura 2. Concentração de P em plantas de arroz em função da interação P e Si no solo LVA. As barras de erro indicam o erro padrão da média ($n = 3$).

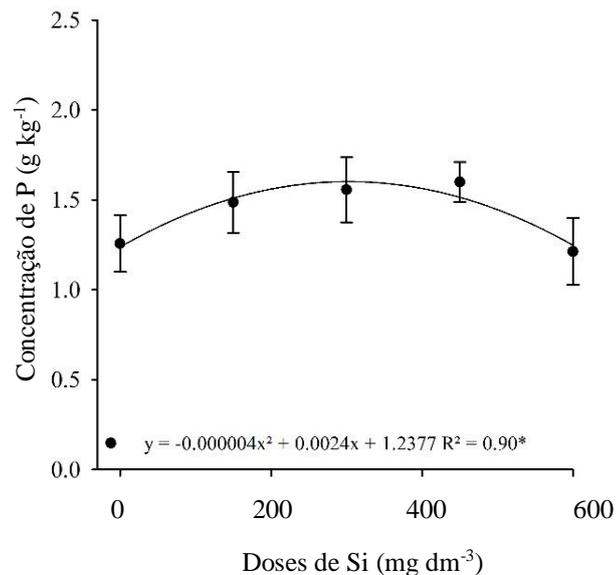


Tabela 3. Concentração de P em plantas de arroz em função das doses de P aplicadas nos solos LVA e LVdf.

Solo	Doses de P (mg dm^{-3})	Concentração de P (g kg^{-1})
LVA	200	$1.10 \pm 0.10b$
	300	$1.74 \pm 0.06a$
LVdf	260	$1.01 \pm 0.06b$
	390	$1.27 \pm 0.06a$

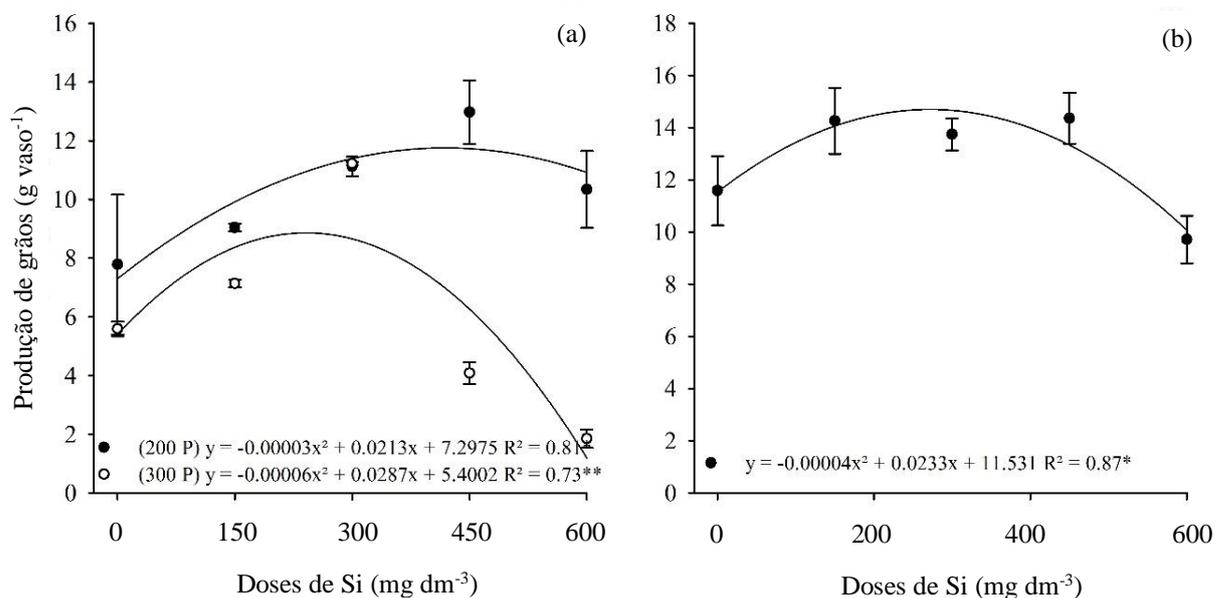
Médias seguidas da mesma letra não diferem ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

Segundo Carvalho et al. (2001), a ação do Si na dessorção de P é mais evidente no solo menos intemperizado, com maior teor de caulinita (Cambissolo) do que no solo mais intemperizado, com maior teor de gibbsita (Latossolo). Além disso, em solos onde não existe deficiência de P, as frações fosfatadas e a atividade da fosfatase em plantas não mostram sensibilidade suficiente para detectar reduzidos percentuais de P dessorvido pelo Si. Dessa forma, a ausência do efeito das doses de Si estudadas sobre o teor de P nas plantas de arroz quando cultivadas em LVdf pode ser atribuída a maior retenção do P nos constituintes mineralógicos desse solo, não havendo as doses de Si aplicadas, força de dessorção suficiente para aumento da disponibilidade e absorção de P pelas plantas.

4.2 Produção de grãos, número de grãos por panícula e altura de plantas

A produção de grãos no LVA foi influenciada significativamente pela interação P e Si ($P < 0,005$). Houve maior produção de grãos na dose de 200 mg dm⁻³ de P, apresentando ajuste quadrático em função das doses de Si, com ponto de máxima (11,08 g vaso⁻¹) na dose de 355 mg dm⁻³ de Si (Figura 3A). No LVdf, a produção de grãos apresentou efeito isolado para os fatores estudados. Houve ajuste quadrático em função das doses de Si, com MSG máxima (14,92 g vaso⁻¹) na dose de 291 mg dm⁻³ de Si (Figura 3B). Enquanto a dose de 260 mg dm⁻³ de P promoveu um aumento de 17,3% (13,93 g vaso⁻¹), quando comparado a aplicação de 390 mg dm⁻³ de fósforo (Tabela 4).

Figura 3. Produção de grãos de arroz em função da interação P e Si no solo LVA (a) e LVdf (b). As barras de erro indicam o erro padrão da média (n = 3).



Os números de grãos por panícula (NGP) no LVA foram influenciados pela interação P e Si ($p < 0,05$). O NGP foi maior na dose de 200 mg dm^{-3} de P, apresentando ajuste quadrático com ponto de máxima (58,91 grãos por panícula) na dose de 511 mg dm^{-3} de Si (Figura 4A). No LVdf, houve efeito isolado para os fatores estudados. Houve ajuste quadrático em função das doses de Si, com NGP máximo (67 grãos por panícula) na dose de 256 mg dm^{-3} de Si (Figura 4B). Já na dose de 260 mg dm^{-3} de P houve um incremento de 17,22% no NGP (64,50 grãos por panícula) quando comparado com a dose de 390 mg dm^{-3} de fósforo (Tabela 4).

Figura 4. Número de grãos por panícula de arroz em função da interação P e Si no solo LVA (a) e LVdf (b). As barras de erro indicam o erro padrão da média ($n = 3$).

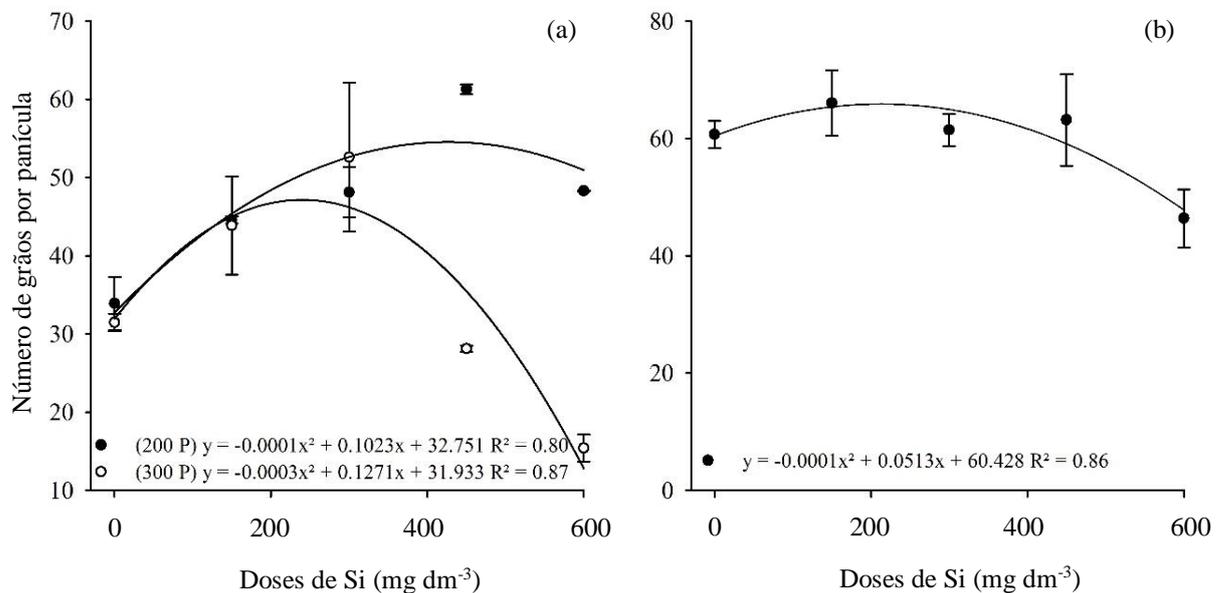


Tabela 4. Produção de grãos e número de grãos por panícula de arroz em função das doses de P aplicadas no solo LVdf.

Doses de P (mg dm^{-3})	NGP	Produção de Grãos (g vaso^{-1})
260	64.51±3.98a	13.93±1.08a
390	53.40±3.35b	11.52±0.78b

Médias seguidas da mesma letra não diferem ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

Ma et al. (1989) observaram que as plantas supridas com Si apresentaram maior biomassa, folhas mais eretas e maior rendimento de grãos em comparação às não supridas com esse elemento. Esse efeito pode ser atribuído ao fato das plantas apresentarem o desenvolvimento de folhas mais eretas, aumentando interceptação de luz solar e intensificando

a fotossíntese, por melhorar a distribuição luminosa, uma vez que o ângulo foliar influencia o grau de saturação luminosa das folhas superiores, e a quantidade de luz absorvida, por alterar a refletância, a absorvância e a área foliar atingida (MA et al., 1989; EPSTEIN, 1999).

Tokura et al. (2007) verificaram que na produção de MSG, somente a aplicação de P exerceu efeito significativo para essa variável. Em um RQo, a produção de MSG apresentou um efeito depressivo em dose acima de 240 mg dm^{-3} de P. Por outro lado, no LVdf apresentou incrementos lineares com as doses de P. Segundo os autores, a maior produtividade alcançada pode ser atribuída ao maior equilíbrio e vigor no desenvolvimento da planta, que neste caso teria fotoassimilados suficientes para o enchimento das espiguetas.

No LVA a altura de plantas apresentou efeito isolado para os fatores estudados. A altura máxima (61,5 cm) foi obtida com a aplicação de 292 mg dm^{-3} de Si (Figura 5), enquanto a dose de 200 mg dm^{-3} de P proporcionou uma maior altura de plantas (60,19 cm) (Tabela 5). No LVdf a altura de plantas foi influenciada somente pelas doses de P aplicadas, sendo que na dose de 260 mg dm^{-3} de P a altura de plantas foi de 64,5 cm, valor 9% maior quando comparado a dose de 390 mg dm^{-3} de P (Tabela 5). Resultado similar foi encontrado por Marchezan et al. (2004) e Assis et al. (2000), que não observaram diferença na altura de plantas de arroz irrigado quando acrescentaram Si à adubação.

Figura 5. Altura de plantas de arroz em função da interação P e Si no solo LVA. As barras de erro indicam o erro padrão da média ($n = 3$).

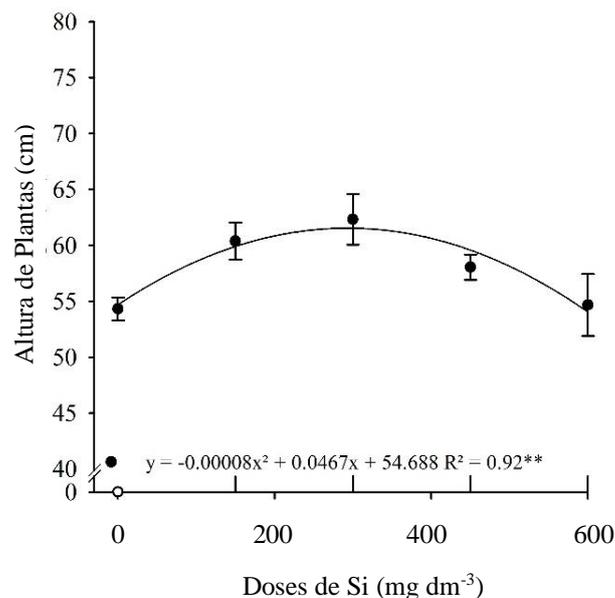


Tabela 5. Altura de plantas de arroz em função das doses de P aplicadas no solo LVA e LVdf.

Solo	Doses de P (mg dm ⁻³)	Altura de Plantas (cm)
LVA	200	60.19±2.20a
	300	55.70±1.53b
LVdf	260	64.50±1.07a
	390	58.50±0.75b

Médias seguidas da mesma letra não diferem ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

5 CONCLUSÃO

No LVA, a dose de 365 mg.dm⁻³ de Si e 200 mg.dm⁻³ de P apresentaram melhores resultados para concentração de P e Si, produção de grãos, NPG e altura de plantas.

No LVdf, a dose de 270 mg.dm⁻³ de Si aumentou a produção de grãos e o NGP. A dose de 260 mg.dm⁻³ de P apresentou maior concentração de Si, produção de grãos, NGP a altura de plantas. A aplicação de Si não influenciou na concentração de P e na altura de plantas.

6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

- AHMED, N.; MURTAZA, M.; ALI, M. A.; HUSSAIN, M. B.; MAHMOOD, S.; QAZI, M. A.; HAIDER, Z. Silicon improves rice nutrition and productivity under salinity. **Pak. J. Bot**, v. 51, n.3, p.837-843, 2019.
- BITTENCOURT, M.; KORNDORFER, G.; QUEIROZ, A.; RAMOS, L.; VIDAL, A.; NOLLA, A. Concentração de silício e pH do solo afetados pela incubação de diferentes fontes silicatadas no solo. **Simpósio sobre silício na agricultura**, v.3, 2004.
- BORÉM, A.; RANGEL, P. H. N. **Arroz do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2015. 242 p.
- BRESEGHELLO, F. et al. BRS Pepita: cultivar de arroz de terras altas produtiva e precoce. **Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado Técnico**, 2007.
- CARVALHO, R. et al. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p. 69-74, 2000.
- CARVALHO, R. et al. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 557-565, 2001.
- CHEN, D.; CHEN, D.; XUE, R., LONG, J.; LIN, X.; LIN, Y., ... SONG, Y. Effects of boron, silicon and their interactions on cadmium accumulation and toxicity in rice plants. **Journal of hazardous materials**, v. 367, p. 447-455, 2019.
- COLTRO, L. et al. Environmental profile of rice production in Southern Brazil: A comparison between irrigated and subsurface drip irrigated cropping systems. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 153, p. 491-505, 2017.
- CONAB. Séries históricas das safras. 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=10>. Acesso em 24 de março de 2021.
- CONDON, L. M.; NEWMAN, S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 5, p. 830-840, 2011.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J.; WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Global environmental change**, v. 19, n. 2, p. 292-305, 2009.
- CORDELL, D.; WHITE, S. Peak phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. **Sustainability**, v.3, n.10, p. 2027–2049. 2011.
- CORDELL, D.; WHITE, S. Life's bottleneck: sustaining the world's phosphorus for a food secure future. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 39, p. 161-188, 2014.
- DESMIDT, E.; GHYSELBRECHT, K.; ZHANG, Y.; PINOY, L.; VAN DER BRUGGEN, B.; VERSTRAETE, W.; RABAEY, K.; MEESSCHAERT, B. Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n.4, p. 336–384. 2015.

DEUS, A. C. F.; DE MELLO PRADO, R.; ALVAREZ, R. D. C. F.; DE OLIVEIRA, R. L. L.; FELISBERTO, G. Role of silicon and salicylic acid in the mitigation of nitrogen deficiency stress in rice plants. **Silicon**, p. 1-2, 2019.

ELSER, J. J.; ELSER, T. J.; CARPENTER, S. R.; BROCK, W. A. Regime shift in fertilizer commodities indicates more turbulence ahead for food security. **PLoS One**, v. 9, n.5, 2014.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solo. Brasília: Embrapa. 3ª edição revista e atualizada. 353p. 2013.

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

FAO - Food and Agriculture organization of the United Nations. Rice Market Monitor, April 2018, Volume XXI, No 1, 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/economic/est/publications/rice-publications/rice-market-monitor-rmm/en/>. Acesso em: 22 de março de 2021.

FAO. FAOSTAT. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. Acesso em: 23 de março de 2021.

FERREIRA, M. M. M. Sintomas de deficiência de macro e micronutrientes de plantas de milho híbrido BRS 1010. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 6, n. 1, p. 74-83, 2012.

FISHER, R. A. A preliminary note on the effect of sodium silicate in increasing the yield of barley. **J. agric. Sci**, v. 19, n. 1, p. 132-139, 1929.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J.L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: Funep, 1993. 221p.

FRANÇA, L. L.; DIERINGS, C. A.; DE SOUSA ALMEIDA, A. C.; DA SILVA ARAÚJO, M.; HEINRICHS, E. A.; DA SILVA, A. R., ... DE JESUS, F. G. Resistance in rice to *Tibraca limbativentris* (Hemiptera: Pentatomidae) influenced by plant silicon content. **Florida Entomologist**, v. 101, n. 4, p. 587-591, 2018.

FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. **Bragantia**, Campinas, v. 66, p. 669-647, 2007.

FREITAS, L. B. FERNANDES, D. M.; MAIA, S. C. M. Silicon on the mineral nutrition and aluminum accumulation in upland rice plants. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 4, p. 440, 2015.

FUENTES, B. et al. Assessment of phosphorus bioavailability from organic wastes in soil. **Developments in Soil Science**, v. 32, p. 363-411, 2008.

FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 252p.

GONG, H. J.; CHEN, K. M.; CHEN, G. C.; WANG, S. M.; ZHANG, C. L. Effects of silicon on growth of wheat under drought. **Journal of plant nutrition**, v. 26, n.5, p.1055-1063, 2003.

HAYNES, Richard J. Significance and role of Si in crop production. **Advances in Agronomy**, v. 146, p. 83-166, 2017.

HASANUZZAMAN, M. et al. Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in Brassica napus L. **South African Journal of Botany**, v. 115, p. 50-57, 2018.

HAWERROTH, C. et al. Silicon-mediated maize resistance to macrospora leaf spot. **Tropical Plant Pathology**, v. 44, n. 2, p. 192-196, 2019.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; FAGERIA, N. K.; CASTRO, L. M. D. Evaluation of physiological traits in upland rice for adaptation to no-tillage system. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 21, n. 2, p. 113–122, 2009.

HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Anion desorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining the adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, v.23, p.177-192, 1972.

HU, A. Y. et al. Silicon accumulated in the shoots results in down-regulation of phosphorus transporter gene expression and decrease of phosphorus uptake in rice. **Plant and soil**, v. 423, n. 1, p. 317-325, 2018.

HUMINICKI, D. M. C.; HAWTHORNE, F. C. The crystal chemistry of the phosphate minerals. Phosphates: Geochemical, **Geobiological and Materials Importance**, v. 48, p. 123–254, 2002.

JOHNSTON, A.E.; POULTON, P.R.; FIXEN, P.E.; CURTIN, D. Phosphorus: its efficient use in agriculture. **Advances in agronomy**. v. 123, p. 177–228, 2014.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. In: *Advances in agronomy*. Academic Press, 1967. p. 107-149.

KOLLÁROVÁ, Karin et al. The response of maize protoplasts to cadmium stress mitigated by silicon. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 170, p. 488-494, 2019.

KORNDÖRFER, G. H.; ARANTES, V. A.; CORRÊA, G. F.; SNYDER, G. H. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 635-641, 1999.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 34 p. (Boletim técnico, 2).

KOSTIC, L.; NIKOLIC, N.; BOSNIC, D.; SAMARDZIC, J.; NIKOLIC M. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. **Plant Soil**, v. 419, p.447–455, 2017.

LEITE, P. C. **Interação silício-fósforo em Latossolo-Roxo cultivado com sorgo em casa-de-vegetação**. Viçosa : UFV, 1997. 87 p. Tese de Doutorado.

LIMA, G. G.; PIAS, O. H. D. C.; MARTINS, A. P.; TIECHER, T.; CARMONA, F. D. C. Yield and profitability of flooded rice genotypes in relation to nitrogen doses and phosphorus and potassium application. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, 2020.

LIMA, J. M. E. et al. Relação qualidade de moagem e qualidade fisiológica de sementes de arroz durante o armazenamento. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 42, n. 1, p. 31-40, 2019.

LOPES, M. S. **Relações entre o pH e a adsorção de fósforo e silício em solos**. 1997. 45 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plant. In: DATNOFF, L.E.; KORNDÖRFER, G.H.; SNYDER, G. (Ed.). Silicon in agriculture. **Elsevier Science**, New York, p.17-39, 2001.

MA, J. F.; NISHIMURA, K.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of rice plant at different growth stages. **Soil Science Plant Nutrition**, v. 35, p. 347-356, 1989.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. Effect of silicic acid on phosphorus uptake by rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 35, n. 2, p. 227-234, 1989.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. **Plant Soil**, v. 126, p.115–119, 1990.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Siliconuptakeandaccumulation in higherplants. **Trends in Plant Science**, v.11, p.392-397, 2006.

MARCHEZAN, E.; VILLA, S. C. C.; MARZARI, V.; KORNDORFER, G. H.; DO SANTOS, F. M. Aplicação de silício em arroz irrigado: efeito nos componentes da produção. **Bioscience Journal**, v. 20, n.3, 2004.

MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soil solutions: II. The adsorption of monosilicic acid by soil and by other substances. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 43, n. 1, p. 83-96, 1963.

MELO, F. M.; MENDONÇA, L. P. C. Avaliação da disponibilidade de fósforo em solo argiloso com diferentes teores de matéria orgânica. **Humanidades & Tecnologia**, v. 18, n. 1, p.52-67, 2019.

MENEGALE, M. L. C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.4, p. 435-454, 2015.

MILIĆ, S.; NINKOV, J.; ZEREMSKI, T.; LATKOVIĆ, D.; ŠEREMEŠIĆ, S.; RADOVANOVIĆ, V.; ŽARKOVIĆ, B. Soil fertility and phosphorus fractions in a calcareous chernozem after a longterm field experiment. **Geoderma**, v. 339, p. 9–19. 2019

NEVES, J. M. G. et al. Silicon and boron mitigate the effects of water deficit on sunflower. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 3, p. 175-182, 2019.

OKUDA, A.; TAKAHASHI, E. Studies on the physiological role of silicon in crop plant (part 7): effect of silicon supply on the growth of rice plant on various phosphorus levels. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.33, p. 65–69, 1962.

OWINO-GERROH, C.; GASCHO, G. Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize. **Commun Soil Sci Plant Anal**, v. 35, p.2369–2378, 2005.

PINHEIRO, B. D. S.; CASTRO, E. da M. de; GUIMARÃES, C. M. Sustainability and profitability of aerobic rice production in Brazil. **Field Crops Research**, v. 97, n. 1, p. 34–42, 2006.

PINTO, L. A. D. S. R.; BEUTLER, S. J.; ASSUNÇÃO, S. A.; ROSSI, C. Q.; GUARESCHI, R. F.; ZANDONÁ, S. R., ... PEREIRA, M. G. Extração e quantificação das frações de fósforo orgânico no solo. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.6, p. 34260-34278. 2020.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Potafos, 1991, 343p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: a Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, Version 3.2.3. 2018.

REIS, A. F. D. B.; NASCENTE, A. S.; ALMEIDA, R. E. M. D.; CHAGAS JÚNIOR, A. F. Crescimento e teores de nutrientes em arroz de terras baixas em razão de adubação com fósforo e potássio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n.2, p. 98-108. 2018.

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

RYAN, J.; IBRIKCI, H.; DELGADO, A.; TORRENT, J.; SOMMER, R.; RASHID, A. Significance of phosphorus for agriculture and the environment in the West Asia and North Africa region. **Advances in Agronomy**, v. 114, p. 91-153, 2012.

SAITO, K.; ASAI, H.; ZHAO, D.; LABORTE, A. G.; GRENIER, C. Progress in varietal improvement for increasing upland rice productivity in the tropics. **Plant Production Science**, v. 21, n. 3, p. 145–158, 2018.

SILVA, J. E. P. **Parâmetros produtivos e atividade de fosfatase ácida em três gramíneas forrageiras cultivadas com doses de fósforo**. Piracicaba: USP/ESALQ, 1996. 81p. (Dissertação - Mestrado).

SILVA, F.C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

STEVENSON, F. J.; COLE, M. A. **Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. John Wiley & Sons, 1999.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: 2006.3 ed. cap. 12, p. 300-301

- TOKURA, A. M.; NETO, A. E. F.; CURI, N., CARNEIRO, L. F.; ALOVISI, A. A. Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.29, n.1, p.9-16, 2007.
- TURNER, B. L.; CADE-MENUN, B. J.; CONDRON, L. M.; NEWMAN, S. Extraction of soil organic phosphorus. **Talanta**. Elsevier, v. 66, n.2, p. 294–306, 2005.
- TURNER, B.L.; LAMBERS, H.; CONDRON, L. M.; CRAMER, M. D.; LEAKE, J. R.; RICHARDSON, A. E.; SMITH, S. E. Soil microbial biomass and the fate of phosphorus during long-term ecosystem development. **Plant and Soil**, v. 367, v. 1–2, p. 225–234, 2013.
- UYGUR, V.; DURGUN, B.; SENOL H. Chemical Fractions of Phosphorus: The Effect of Soil Orders, Soil Properties, and Land Use. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. Taylor & Francis, v. 48, n.11, p.1319–1335, 2017.
- VENTIMIGLIA, Luis Alberto et al. Potencial de rendimento da soja em razão da disponibilidade de fósforo no solo e dos espaçamentos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 195-199, 1999.
- WELLMER, F-W.; SCHOLZ, R. W. Putting phosphorus first: the need to know and right to know call for a revised hierarchy of natural resources. **Resources**, v. 6, n. 2, p. 20, 2017.
- ZHU, Y. et al. Transcriptomic dynamics provide an insight into the mechanism for silicon-mediated alleviation of salt stress in cucumber plants. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 174, p. 245-254, 2019.