

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS COMO FONTES DE SILÍCIO E
CONDICIONADORES DE SOLOS TROPICAIS EM CULTIVO DE ARROZ
INUNDADO

CAMILA DE ANDRADE CARVALHO GUALBERTO

2018

CAMILA DE ANDRADE CARVALHO GUALBERTO

SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS COMO FONTES DE SILÍCIO E
CONDICIONADORES DE SOLOS TROPICAIS EM CULTIVO DE ARROZ
INUNDADO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Mestrado, na área de concentração em Solos, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer

Coorientadores

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira

Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme/UFLA

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

G899s
2018 Gualberto, Camila de Andrade Carvalho, 1991
Subprodutos industriais como fontes de silício e condicionadores de solos tropicais em cultivo de arroz inundado / Camila de Andrade Carvalho Gualberto. - 2018.
64 f. : il.

Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer.

Coorientador: Hamilton Seron Pereira.

Coorientador: Luiz Roberto Guimarães Guilherme.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.747>

Inclui bibliografia.

1. Agronomia - Teses. 2. Arroz - Irrigação - Teses. 3. Fertilizantes fosfatados - Teses. 4. Silício na agricultura.- Teses. I. Korndörfer, Gaspar Henrique. II. Pereira, Hamilton Seron. III. Guilherme, Luiz Roberto Guimarães. IV. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. V. Título.

CDU: 631

Angela Aparecida Vicentini Tzi Tziboy – CRB-6/947

CAMILA DE ANDRADE CARVALHO GUALBERTO

SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS COMO FONTES DE SILÍCIO E
CONDICIONADORES DE SOLOS TROPICAIS EM CULTIVO DE ARROZ
INUNDADO

Dissertação apresentada à Universidade Federal
de Uberlândia, como parte das exigências do
Programa de Pós-graduação em Agronomia –
Mestrado, na área de concentração em Solos,
para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 09 de fevereiro de 2018.

Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme
(coorientador)

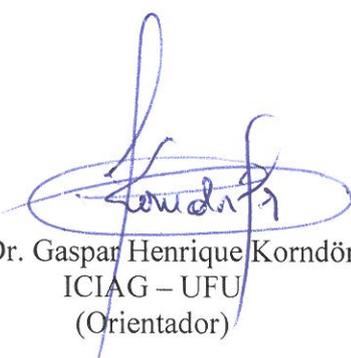
UFLA

Prof. Dr. Enio Tarso de Souza Costa

UFU

Dr. Gustavo Alves Santos

KP Consultoria



Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer
ICIAG – UFU
(Orientador)

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

A Deus e à Nossa Senhora Aparecida, por todas as portas abertas e por nunca me deixarem desamparada.

Ao meu avô Joaquim (in memoriam), por todo amor que me deu em vida e por me ensinar a buscar sempre o meu melhor.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai do céu, por toda a proteção e graças em minha vida.

Ao meu esposo e companheiro, Henrique, meu eterno agradecimento por toda a ajuda e por compreender todos os meus momentos de dificuldades. Seu valioso e incansável apoio foi definitivo para a conclusão deste trabalho. Amo você!

À minha família, em especial aos meus irmãos, André, Gabriel e Marcela, que sempre estiveram tão presentes, me apoiando em momentos difíceis e comemorando as minhas conquistas.

Aos professores Gaspar Henrique Korndorfer e Luiz Roberto Guimarães Guilherme, muito obrigada por todas as oportunidades concedidas. Agradeço também pela amizade, pela confiança, por todo ensinamento e pelo exemplo de comportamento ético e profissional. Vocês são grandes incentivadores!

Ao professor Hamilton Seron Pereira, toda a minha gratidão. Agradeço imensamente por toda a ajuda e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho. Seus sábios conselhos foram essenciais em todos os momentos.

Ao professor Enio Tarso de Souza Costa, por aceitar participar da banca e por toda a amizade e ensinamentos compartilhados nesses anos de convivência. Muito obrigada!

À Universidade Federal de Uberlândia e ao CNPq, pela oportunidade de desenvolver este trabalho e concessão da bolsa de estudos.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa "Silício na Agricultura" (GPSi), por toda a ajuda e amizade. Agradeço em especial aos amigos Luiz Henrique, Gustavo, Thiago e Bárbara que tanto contribuíram e auxiliaram na pesquisa. Agradeço também às amigas Tati, Gabi, Géssika, Paula e Angélica por todos os bons momentos de convivência.

Aos amigos e técnicos do Laboratório de Análise de Solo (LABAS), por toda a ajuda e ensinamentos.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	7
2. REFERÊNCIAS.....	9
ARTIGO 1 - Características químicas de solos tropicais com a utilização de um subproduto da indústria fosfatada	11
RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. MATERIAL E MÉTODOS	15
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4. CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS.....	34
ARTIGO 2 - Subprodutos industriais como fontes de silício para a cultura do arroz irrigado por inundação.....	38
RESUMO.....	38
ABSTRACT.....	39
1. INTRODUÇÃO	40
2. MATERIAL E MÉTODOS	42
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4. CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS.....	61

RESUMO

GUALBERTO, CAMILA DE ANDRADE CARVALHO. **Subprodutos industriais como fontes de silício e condicionadores de solos tropicais em cultivo de arroz inundado**. Uberlândia: UFU, 2018. 64p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.¹

Objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de um subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados nas características químicas de solos tropicais, bem como a comparação entre este subproduto e um subproduto da indústria siderúrgica como fontes de Si para a cultura do arroz irrigado por inundação. Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação localizada no Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia - MG, Brasil. No primeiro experimento, utilizou-se, além do suproduto da indústria fosfatada (AgroSiCa), uma fonte de Si considerada padrão (Wollastonita - CaSiO_3) para fins de comparação. As fontes foram incubadas por 60 dias em dois tipos de solo, sendo um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd) (> 60% de argila) e um NEOSSOLO QUARTZARENICO Órtico típico (RQo) (< 15% de argila), em diferentes doses de Si (0, 200, 400 e 600 kg ha^{-1} de Si). Após o período de incubação, foram avaliados os teores de Si e P disponíveis, pH, Al e Ca trocáveis e a adsorção de P nos solos através das isotermas de Langmuir. Para o segundo experimento, testaram-se o AgroSiCa, a Wollastonita e um agregado siderúrgico (EAA). Foram utilizados os mesmos solos e as mesmas doses do primeiro experimento, entretanto, neste caso, realizou-se o plantio de arroz após o período de incubação. Aos 89 dias após a semeadura, as plantas foram colhidas e foram quantificados os teores foliares de Si, Ca e P e a matéria seca da parte aérea (MSPA). Também foi realizada a coleta de amostras de solo para as análises de Si, Ca e P. No primeiro experimento, foram observados maiores valores de pH e teores de Ca, P e Si disponíveis nos solos com a aplicação do AgroSiCa, além da diminuição dos teores de Al trocável e dos valores de capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP). Ressalta-se ainda que o AgroSiCa está apto para ser registrado como fonte de Si pelo MAPA. Quanto ao segundo experimento, ambos os subprodutos foram eficientes em aumentar a MSPA, bem como os teores de Si, Ca e P nas amostras de solo e acumulados na parte aérea de plantas de arroz. Entretanto, o subproduto da indústria fosfatada promoveu maiores acúmulos dos nutrientes nas plantas de arroz.

Palavras-chave: Agregados siderúrgicos, AgroSiCa, características químicas, *Oryza sativa* L.

¹ Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU.

Coorientadores: Hamilton Seron Pereira – UFU e Luiz Roberto Guimarães Guilherme - UFLA.

ABSTRACT

GUALBERTO, CAMILA DE ANDRADE CARVALHO. **Industrial by-products as silicon sources and soil conditioners in tropical soils cultivated with flooded rice.** Uberlândia: UFU, 2018. 64p. Dissertation (Masters in Agronomy / Soil Science) - Federal University of Uberlândia, Uberlândia.²

The objective of this study was to evaluate the effect of a by-product from the phosphate fertilizer industry on chemical characteristics of tropical soils, as well as a comparison between this by-product and a by-product from the steel industry as silicon (Si) sources for flooded rice. Two experiments were carried out under greenhouse conditions at the Institute of Agricultural Science (ICIAG) at Federal University of Uberlândia (UFU), Uberlândia - MG, Brazil. In the first experiment, in addition to the phosphate fertilizer by-product, a standard source of Si (Wollastonite - CaSiO_3) was used for comparison purposes. The sources were incubated for 60 days on two soil types, a Typic Dystrustox (LVd) (> 60% of clay) and a Typic Quartzipsamment (RQo) (<15% of clay) at different Si doses (0, 200, 400, and 600 kg ha^{-1} of Si). After the incubation period, the levels of available Si, P and Ca, pH, interchangeable Al, and P adsorption mechanisms in soils through Langmuir isotherms were evaluated. In the second experiment, AgroSiCa, Wollastonite and a by-product from the steel industry (EAA) were used. The same soils and doses of the first experiment were used, but, in this case, rice plants were grown after the incubation period. At 89 days after sowing, rice plants were harvested and dry matter (DM), Si, Ca and P levels in plants were quantified. In addition, soil samples were collected for Si, Ca and P analysis. Higher values of pH, Ca, P and Si were observed in soils under AgroSiCa application in the first experiment, as well as decreasing of Al levels and maximum phosphorus adsorption capacity (MPAC) values. It was also noted that AgroSiCa can be registered as a source of Si according to Brazilian regulations. In the second experiment, the application of both by-products resulted in increase of DM, Si, Ca, and P contents in soil samples and accumulated in rice plants. However, the by-product from the phosphate industry promoted greater nutrients accumulation in rice plants.

Keywords: Slags, AgroSiCa, chemical characteristics, *Oryza sativa* L.

² Advisor: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU.

Co-Advisors: Hamilton Seron Pereira – UFU and Luiz Roberto Guimarães Guilherme - UFLA.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Gerados em praticamente todas as etapas dos processos de produção, os subprodutos industriais apresentam variações tanto em sua composição química quanto em volume gerado devido, principalmente, às diferentes matérias-primas utilizadas. Assim, o estudo e o conhecimento das características dos subprodutos gerados nas indústrias, do valor econômico e do possível reuso, através da obtenção de novos produtos, tem sido estimulado pela crescente preocupação com o gerenciamento desses materiais.

A Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto de 2010, por meio da qual foi instituída a política nacional de gestão de subprodutos industriais (BRASIL, 2010), visa a disposição final ambientalmente adequada dos subprodutos gerados durante os processos de produção, incluindo a reutilização e o tratamento dos mesmos, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e a minimizar os impactos ambientais adversos. Entretanto, a atividade industrial produz, em geral, vários subprodutos cujas tecnologias adequadas para sua reutilização estão aquém dos volumes produzidos (SANTOS et al, 2014).

Uma das maiores dificuldades para o desenvolvimento de ações de tratamento e destinação de subprodutos industriais é a ausência de técnicas de processamento e beneficiamento compatíveis à quantidade do material produzido. Além disso, esses produtos têm sido acumulados por não apresentarem um valor aparente (BROWN, 2003) ou pelo não conhecimento do seu potencial para possível reuso.

Neste sentido, o uso de subprodutos industriais como matérias-primas em outros processos produtivos, transformando esses materiais em novos produtos úteis (MANHÃES; HOLANDA, 2008) e de baixo custo, é uma alternativa para melhor utilização dos volumes produzidos. Neste contexto, a utilização de subprodutos para fins agrícolas tem se tornado uma opção frequente, visto que possuem, muitas vezes, características de correção de acidez e/ou fornecedores de nutrientes ao solo (ERIKSEN et al., 1999; WOLKOWSKI, 2003).

A composição química de muitos dos subprodutos gerados faz com que esses materiais possuam grande potencial de uso agrícola em solos tropicais, considerando-se que, em geral, esses solos apresentam elevada acidez e baixa fertilidade natural (KER, 1997). Além disso, o custo da produção agrícola de regiões tropicais é significativamente aumentado pelas grandes quantidades de fertilizantes demandadas,

tornando-se interessante a utilização de subprodutos industriais como fontes alternativas de nutrientes.

Dentre os subprodutos industriais que apresentam potencial para o fornecimento de nutrientes ao solo, destacam-se os agregados siderúrgicos (CAMARGO et al., 2007; VIDAL; PRADO, 2011) e os subprodutos da indústria de fertilizantes fosfatados (VALLE, 2016).

Os agregados siderúrgicos utilizados na agricultura, provenientes da produção do aço, níquel e ferro-gusa, podem fornecer cálcio (Ca), magnésio (Mg) e silício (Si) para as culturas, bem como proporcionar a correção da acidez do solo (CORRÊA et al., 2007). Korndörfer et al. (2004) afirmam que os subprodutos da indústria do aço possuem alto conteúdo de Si solúvel, bem como grande facilidade de aplicação mecanizada, adequadas relações e quantidades de Ca e Mg, custo reduzido e baixo potencial de contaminação do solo com metais pesados. Ademais, ressalta-se que a destinação dos agregados para as práticas agrícolas minimiza o acúmulo do material nos pátios das indústrias produtoras de ferro e aço (PRADO et al., 2004).

Na indústria de fertilizantes fosfatados, a acidulação da rocha fosfática para a obtenção do ácido fosfórico gera subprodutos que podem, após transformação/beneficiamento, apresentar potencial de uso agrícola por conter elementos essenciais e benéficos para as plantas. Um dos subprodutos obtidos após o tratamento de resíduos da indústria fosfatada é um precipitado de fluorita (CaF_2) e óxido de silício ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Este subproduto se destaca por apresentar em sua composição Ca e Si, que podem ser fornecidos às plantas, e flúor (F) que, embora não seja considerado elemento essencial às plantas, contribui de forma benéfica na dinâmica de nutrientes nos solos (VALLE et al., 2016).

Uma característica semelhante dos subprodutos gerados em ambas as atividades industriais é a presença de Si na sua composição. Apesar de ser conhecido o efeito benéfico do Si na produtividade e no manejo de diversas culturas, a exemplo das gramíneas (EPSTEIN, 1994), o fornecimento do nutriente via fertilizante não tem sido estudado intensivamente. Isto ocorre devido à necessidade da adubação silicatada estar relacionada, muitas vezes, aos benefícios indiretos causados pelo elemento, como a resistência das plantas aos estresses bióticos e abióticos. Este fato é especialmente relevante em agroecossistemas tropicais, onde a necessidade de uso de pesticidas para o controle de estresses bióticos é maior quando comparado aos ecossistemas temperados (CHELINHO et al., 2012)

Com este estudo, propõe-se a utilização agrícola de subprodutos das indústrias siderúrgicas e fosfatadas, avaliando seus efeitos nas características químicas de solos tropicais, bem como a capacidade de fornecer Si às plantas.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 28 de nov. de 2017.

BROWN, L. R. **Eco-economia: construindo uma economia para a terra**. 1 ed. Salvador: Universidade Livre da Mata Atlântica (UMA), 2003. 368p.

CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S. Solubilidade do silício em solos: influência do calcário e ácido silícico aplicados. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 637-647, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000400014>

CHELINHO, S. L. I.; NATAL-DA-LUZ, T.; DOMENE, X.; NUNES, M. E. T. Integrated ecological risk assessment of pesticides in tropical ecosystems: a case study with carbofuran in Brazil. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 31, p. 437–445, 2012. <https://doi.org/10.1002/etc.738>

CORREA, J. C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARCELINO, R.; MAUAD, M. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1307-1317, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000900013>

EPSTEIN, E. The anomaly of silicium in plant biology. **Proceeding National Academic Science**, Washington, v. 91, p. 11-17, 1994.

ERIKSEN, G. N.; COALE, F. J.; BOLLERO, G. A. Soil nitrogen dynamics and maize production in municipal solid waste amended soil. **Agronomy Journal**, v. 91, p. 1009-1016, 1999. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.9161009x>

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, v. 5, p. 17-40, 1997. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v5i1.187>

KORDÖRNFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**, Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004, 25p.

MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização e classificação de resíduo sólido "pó de rocha granítica" gerado na indústria de rochas ornamentais. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 6, p. 1301-1304, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000600005>

PRADO, R. M.; NATALE, W.; FERNANDES, F. M. Liberação de micronutrientes de uma escória de siderurgia aplicada em um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 79, p. 260-274, 2004.

SANTOS, A. T. L.; HENRIQUE, N. S.; SHHLINDWEIN, J. A.; FERREIRA, E.; STACHIW, R. Aproveitamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos para produção de composto orgânico. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**, Manaus, v. 3, n. 1, p. 15-28, 2014.

VALLE, L. A. R.; RODRIGUES, S. L.; RAMOS, S. J.; PEREIRA, H. S.; AMARAL, D. C.; SIQUEIRA, J. O.; GUILHERME, L. R. G. Beneficial use of a by-product from the phosphate fertilizer industry in tropical soils: effects on soil properties and maize and soybean growth. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v.112, p.113-120, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.037>

VIDAL, A. A.; PRADO, R. M. Aplicação de escória siderúrgica, calcário e uréia em Latossolo cultivado com arroz. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n.2, p.264-272, 2011. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i2.13012>

WOLKOWSKI, R. P. Nitrogen management considerations for landspreading municipal solid waste compost. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 32, p. 1844-1850, 2003. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.1844>

CAPÍTULO 1

RESUMO

GUALBERTO, CAMILA DE ANDRADE CARVALHO. **Características químicas de solos tropicais com a utilização de um subproduto da indústria fosfatada.** Uberlândia: UFU, 2018. 28p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.³

A fabricação de fertilizantes fosfatados gera subprodutos, a exemplo do ácido hexafluorossilícico (H_2SiF_6). A neutralização do H_2SiF_6 com óxido de cálcio (CaO) resulta na fluorita com óxido de silício, doravante denominado AgroSiCa, um subproduto com potencial de uso agrícola em solos tropicais. Objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses do AgroSiCa nas características químicas de solos tropicais, a fim de verificar a eficiência do subproduto em promover melhorias à fertilidade do solo, bem como a sua adequabilidade para uso agrícola, segundo recomendações pertinentes ao registro de produtos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (MAPA). O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia - MG, Brasil. Utilizou-se, além do AgroSiCa, uma fonte de Si considerada padrão (Wollastonita - $CaSiO_3$) para fins de comparação. As fontes foram incubadas por 60 dias em dois tipos de solo, sendo um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd) (69% de argila) e um NEOSSOLO QUARTZARENICO Órtico típico (RQo) (9% de argila), nas doses de 0, 200, 400 e 600 $kg\ ha^{-1}$ de Si. Após o período de incubação, foram avaliados os teores de Si e P disponíveis, pH, Al e Ca trocáveis e a adsorção de P nos solos através das isotermas de Langmuir. Maiores valores de pH e a diminuição dos teores de Al trocável nos solos foram observados devido à presença de Si e F no subproduto. Além disso, a disponibilização destes elementos pela fonte promoveu menores valores de CMAP em LVd, reduzindo a adsorção de P nos solos e aumentando a disponibilidade deste macronutriente para as plantas. Por fim, a utilização do AgroSiCa também resultou em maiores teores de Si disponível nos solos, estando apto para ser registrado como fonte de Si pelo MAPA.

Palavras-chave: Ácido hexafluorossilícico, AgroSiCa, fertilizante.

³ Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU.

Coorientadores: Hamilton Seron Pereira – UFU e Luiz Roberto Guimarães Guilherme - UFLA.

ABSTRACT

GUALBERTO, CAMILA DE ANDRADE CARVALHO. **Chemical characteristics of tropical soils with the use of a by-product from the phosphate fertilizer industry** Uberlândia: UFU, 2018. 28p. Dissertation (Masters in Agronomy/Soil Science) - Federal University of Uberlândia, Uberlândia.⁴

Phosphate fertilizer industries generate different by-products, as the hexafluorosilicic acid (H_2SiF_6). The neutralization of H_2SiF_6 with calcium oxide results in the production of fluorite with silicon oxide, hereafter referred to as AgroSiCa, a by-product with potential for agricultural use in tropical soils. The objective of this study was to evaluate the effect of different doses of AgroSiCa on the chemical characteristics of tropical soils in order to verify the efficiency of this by-product in improving soil fertility, as well as its potential for agricultural use according to Brazilian regulations. The experiment was carried out under greenhouse conditions at the Institute of Agricultural Science (ICIAG) at Federal University of Uberlândia (UFU), Uberlândia - MG, Brazil. In addition to AgroSiCa, a standard source of silicon (Si) (Wollastonite - CaSiO_3) was used for comparison purposes. The sources were incubated for 60 days on two soil types, a Typic Dystrustox (LVd) (69% of clay) and a Typic Quartzipsamment (RQo) (9% of clay) at different Si doses (0, 200, 400 and, 600 kg ha^{-1} of Si). After the incubation period, the levels of available Si, phosphorus (P) and calcium (Ca) in the soil samples were quantified, as well as pH, exchangeable aluminium (Al) and P adsorption in soils through Langmuir isotherms. Higher pH values and a decrease of exchangeable Al contents in the soils were observed due to the presence of Si and F in the by-product. In addition, the availability of these elements by the source promotes smaller maximum phosphorus adsorption capacity (MPAC) values in LVd, reducing P adsorption in soils and increasing the availability of this macronutrient to plants. Finally, the use of AgroSiCa also results in higher levels of available Si in soils, which allows for the registration of this product as a source of Si according to Brazilian regulations.

Keywords: Hexafluorosilicic acid, AgroSiCa, fertilizer.

⁴ Advisor: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU.

Co-Advisors: Hamilton Seron Pereira – UFU and Luiz Roberto Guimarães Guilherme - UFPA.

1. INTRODUÇÃO

O uso de fertilizantes fosfatados é uma prática essencial em solos tropicais, visto que possuem, em sua maioria, alta capacidade de adsorção do fósforo (P) em óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) e baixos valores de pH. Dessa forma, grandes quantidades de fertilizantes fosfatados são utilizadas para a obtenção de maiores produtividades, sendo que o consumo brasileiro desses fertilizantes passou de 2 milhões de toneladas em 2000 para 5 milhões de toneladas em 2016 (IPNI, 2016).

Os fertilizantes fosfatados solúveis são produtos do processamento, com ácido sulfúrico ou fosfórico, de rochas naturais ricas em fosfato, como exemplo de grande parte dos minérios de P que pertencem ao grupo da apatita. Estes grupos apresentam em sua composição o fosfato cristalino de cálcio (Ca) com flúor (F) que possuem cerca de 1 a 4 % de F (CRONIN et al., 2000).

Assim como as demais atividades industriais, a fabricação de fertilizantes fosfatados gera subprodutos, a exemplo do ácido hexafluorossilícico (H_2SiF_6). Valle et al. (2016) afirmam que a busca pela destinação adequada para o subproduto gerado é um grande desafio, visto que a sua comercialização está aquém dos volumes produzidos.

Entretanto, Blake e Stickney (1966), citado por Yu et al. (2000), relatam que o ácido fluossilícico gerado na acidulação de fosfatos para fertilizantes é considerado uma grande fonte de silício (Si). Ademais, a aplicação de subprodutos da indústria fosfatada é capaz de melhorar as condições agrícolas de solos tropicais, conforme apresentado por Valle et al. (2016).

Surge, neste contexto, a alternativa da neutralização do H_2SiF_6 com óxido de cálcio (cal virgem - CaO), obtendo-se a fluorita com óxido de silício como subproduto, doravante denominado AgroSiCa. O subproduto gerado possui grande potencial de uso agrícola em solos tropicais, podendo ser uma alternativa sustentável para a destinação de tal ácido, uma vez que o AgroSiCa contém Ca, Si e F.

Já são conhecidos os efeitos benéficos de alguns dos elementos contidos no AgroSiCa, como o Ca e o Si. O Ca é um nutriente exigido em grandes quantidades pelas culturas, enquanto o Si é considerado um elemento benéfico à grande maioria dos vegetais superiores. Dentre os benefícios observados com a adubação silicatada, Korndörfer e Datnoff (1995) exaltam o aumento da eficiência fotossintética, a maior resistência ao ataque de pragas e doenças, maior tolerância ao estresse hídrico,

especialmente durante os períodos de veranico e melhorias na arquitetura das plantas. Tais benefícios resultam em maior qualidade do produto colhido e aumentos de produtividade (SOUSA et al., 2010).

O F não é considerado um nutriente e não são conhecidos efeitos benéficos deste elemento no desenvolvimento de plantas. Entretanto, trata-se de um elemento capaz de promover benefícios aos solos tropicais pela redução da fitotoxicidade do Al devido à formação de pares iônicos-Al-F, que são formas menos tóxicas às culturas (AMARAL, 1997). Além disso, a presença de F nos solos pode resultar em competição do elemento pelos sítios de sorção de P no solo (VALLE et al., 2016), diminuindo a sua fixação, aumentando a disponibilidade do nutriente para as plantas e contribuindo para o uso racional das fontes fosfatadas, que são finitas e não renováveis.

Diante do exposto, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses do AgroSiCa nas características químicas de solos tropicais, verificando a eficiência do subproduto em promover melhorias à fertilidade do solo, bem como a sua adequabilidade para uso agrícola, segundo recomendações pertinentes ao registro de produtos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (MAPA).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), campus Umuarama, Uberlândia - MG. As amostras do AgroSiCa foram adquiridas de uma indústria de fertilizantes localizada no município de Uberaba -MG. Estas foram secas em estufa para a avaliação dos teores de umidade das amostras e posteriores análises.

Utilizou-se delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 3 + 1 com quatro repetições. Dessa forma, além do AgroSiCa, utilizou-se uma fonte de Si considerada padrão (Wollastonita - CaSiO_3) e um adicional controle sem a aplicação de quaisquer fontes para fins de comparação. As fontes foram previamente caracterizadas quanto aos teores de Si total e disponível (KORNDÖRFER et al. 2004a), Ca e Mg (EMBRAPA, 1997) e, no caso do AgroSiCa, quanto aos teores de P (MURPHY; RILEY 1962) e F (EYDE, 1983) (Tabela 1).

TABELA 1. Características químicas das fontes utilizadas neste trabalho

Fonte	Si		Ca	Mg	P	-----F-----		
	Total	Disponível	HCl	HCl	H ₂ O	HCl	CNA	H ₂ O
	%							
AgroSiCa	12	5,4	22	0,6*	<LQ*	17,5*	0,3*	0,03*
Wollastonita	24	12	31	1,8	-	-	-	-

Si Total e disponível: Korndorfer et al. (2004a); Ca e Mg: Embrapa (1997); P: Murphy; Riley (1962) e F: Eyde (1983). LQ: limite de quantificação. * Valores apresentados em trabalho de Valle et al. (2016).

Em seguida, os produtos foram incubados por 60 dias em 2 diferentes tipos de solo, um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd) (69% de argila) e um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico (RQo) (9% de argila) (EMBRAPA, 2009), coletados na profundidade de 0-20 cm, cujas características físicas e químicas estão descritas nas tabelas 2 e 3, respectivamente.

TABELA 2. Características físicas dos solos utilizados neste experimento

Solo	Areia	Silte	Argila
	dag kg ⁻¹		
LVd	21	10	69
RQo	90	1	9

Análise textural pelo Método da Pipeta (EMBRAPA, 1997).

TABELA 3. Características químicas dos solos utilizados neste experimento

Solo	pH	Si	K ⁺	P	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	T	t	V	m
	CaCl ₂	--mg dm ⁻³ --			-----cmol _c dm ⁻³ -----				----%----			
LVd	3,8	5,6	18,6	0,2	0,8	0,6	0,1	0,75	3,3	1,55	22,7	51,6
RQo	3,6	2,6	8,1	3,1	0,9	0,6	0,1	0,7	3,5	1,6	20	56,2

Si: CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; P, K: (Mehlich-1); Al, Ca, Mg: (KCl 1 mol L⁻¹); SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; t : CTC efetiva; V: saturação por bases; m: saturação por Al.

Foram utilizados 300 g de solo por amostra, os quais receberam doses de cada produto, obtendo-se teores de Si iguais a 0 (adicional controle), 200, 400 e 600 kg ha⁻¹ (Tabela 4), baseando-se nos teores de Si total de cada fonte. Adicionaram-se 85 mL e 65 mL de água ao LVd e RQo, respectivamente, a fim de manter a umidade em torno de 80% do valor da capacidade de campo de cada solo.

TABELA 4. Tratamentos e doses de Si aplicadas no presente estudo

Fonte	Dose de Si	Si total	Dose da fonte	Dose da fonte
	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	g 300g ⁻¹
Testemunha	0	-	0	0
AgroSiCa	200	12	1657	0,250
AgroSiCa	400	12	3314	0,497
AgroSiCa	600	12	4971	0,746
Wollastonita	200	24	833	0,125
Wollastonita	400	24	1667	0,250
Wollastonita	600	24	2500	0,375

Si Total: Korndorfer et al. (2004a).

As amostras foram mantidas em recipientes plásticos, cujas tampas apresentavam orifícios para permitir a troca gasosa (Figura 1), e a água foi repostada periodicamente. Após 60 dias de incubação, as amostras foram secas em estufa a 50° C, peneiradas e levadas ao laboratório de tecnologia de fertilizantes (LAFER) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), campus Umuarama, Uberlândia - MG, para posteriores análises químicas.



FIGURA 1. Incubação das amostras (a); orifícios nas tampas para permitir a troca gasosa (b).

Com base nos teores de Si disponível nos solos após o período de incubação, realizou-se o cálculo do "Equivalente em Silicato de Cálcio (Eq.SiCa)", utilizando-se a equação abaixo:

$$\text{Eq.SiCa (\%)} = \frac{\sum [(Xf\ 200 - X_t) + (Xf\ 400 - X_t)]}{\sum [(Xw\ 200 - X_t) + (Xw\ 400 - X_t)]} \times 100$$

Onde:

Xf 200 = Teor de Si no solo onde aplicou-se a fonte AgroSiCa (200 kg ha⁻¹ de Si).

Xf 400 = Teor de Si no solo onde aplicou-se a fonte AgroSiCa (400 kg ha⁻¹ de Si).

Xw 200 = Teor de Si no solo onde aplicou-se a fonte Wollastonita (200 kg ha⁻¹ de Si).

Xw 400 = Teor de Si no solo onde aplicou-se a fonte Wollastonita (400 kg ha⁻¹ de Si).

Xt = Teor de Si no solo onde não houve aplicação de Si (adicional controle).

O cálculo do Eq.SiCa está descrito nos parágrafos 9º e 10º do Art. 18 da Instrução Normativa nº 05 de 23 de fevereiro de 2007 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2012), o qual visa determinar a disponibilização de Si de fontes para fins de registro. Assim, valores superiores a 45% para ambos os solos demonstram que a fonte está apta a ser registrada como fonte de Si de acordo com o MAPA.

O P dos solos foi extraído pela solução Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹), conforme método descrito por Tedesco et al. (1995). Também realizaram-se as análises de Ca e Al trocáveis (KCl 1 mol L⁻¹) (TEDESCO et al., 1995) e pH (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) (EMBRAPA, 1997).

Realizou-se ainda a representação matemática dos mecanismos de adsorção de P nos solos através das isotermas de Langmuir, bem como a estimativa da capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP). Os pontos para ajuste das isotermas foram obtidos adicionando-se 50 mL de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, contendo P₂O₅ (KH₂PO₄) nas doses 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 160 e 200 mg dm⁻³, a 5 dm⁻³ de terra fina seca ao ar. Em seguida, após 16 horas de agitação, as amostras foram filtradas e o P na solução de equilíbrio quantificado por colorimetria (BRAGA; DEFELIPO, 1972). Determinaram-se as quantidades de P adsorvidas pela diferença entre as concentrações iniciais e as concentrações da solução de equilíbrio.

As concentrações de P na solução de equilíbrio (C) e os respectivos valores de P adsorvidos foram submetidos ao ajuste das isotermas de Langmuir (NOVAIS et al., 2007). Estas isotermas são funções hiperbólicas descritas pela equação $Q = abC/(1 + aC)$, em que C é a concentração de P na solução de equilíbrio (mg L^{-1}), Q é a quantidade de P adsorvido ao solo (mg g^{-1}), b é a capacidade máxima de adsorção de P (mg g^{-1}) e a é a constante relacionada com a energia de adsorção (L mg^{-1}) de P ao solo (NOVAIS et al., 2007).

As médias dos tratamentos foram submetidas à análise de variância utilizando-se o programa ASSISTAT versão 7.7 beta (SILVA; AZEVEDO, 2016). As médias foram comparadas pelos Testes de Tukey (0,05 de significância) e Dunnet (0,05 de significância). Para a variável dose, realizou-se análise de regressão com auxílio do programa estatístico SISVAR versão 5.3 (FERREIRA, 2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ambas as fontes de Si foram eficientes em aumentar o pH dos solos, obtendo-se valores superiores à testemunha, independentemente da dose utilizada (Tabela 5). Para o solo de textura argilosa (LVd), no qual observou-se interação significativa entre as fontes de Si e as doses utilizadas, a aplicação do subproduto da indústria fosfatada resultou em maiores valores de pH quando comparado à Wollastonita.

TABELA 5. Valores de pH ($\text{CaCl}_2 - 0,01 \text{ mol L}^{-1}$) dos solos em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha^{-1})	LVd		RQo	
	AgroSiCa	Wollastonita	AgroSiCa	Wollastonita
0	3,7		3,5	
200	4,4* A	4,1* B	4,4*	4,3*
400	4,5* A	4,2* B	4,6*	4,4*
600	6,0* A	4,3* B	5,1*	5,1*
Média	5,0	4,2	4,7	4,6

LVd: DMS Tukey: 0,1; DMS Dunnet: 0,2 CV (%): 1,9 - RQo: DMS Dunnet: 0,2; CV(%): 2,0.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Com os ajustes dos modelos de regressão, observa-se que o aumento das doses de Si resultou em acréscimos lineares nos valores de pH para ambas as fontes e solos utilizados (Figura 2).

Em geral, a neutralização da acidez do solo através de fontes silicatadas ocorre pela reação dos ânions SiO_3^{-2} com a água, liberando hidroxilas (OH^-) para a solução do solo (KORNDÖRFER et al., 2004b). Aumentos mais expressivos foram observados com a aplicação do AgroSiCa uma vez que, além de Si, a fonte possui F em sua composição. Perrot et al. (1976) afirmam que a presença de F^- nos solos promove a liberação de OH^- , resultando na elevação do pH. Esta liberação está associada à formação de pares iônicos com hidróxidos de Al, formando compostos Al-F de alta estabilidade, bem como à adsorção do F^- à superfície dos minerais de argila (PARFITT, 1978; FLÜHLER et al., 1982; VALDIVIESO et al., 2006). Assim, solos com predominância de minerais do grupo da caulinita, a exemplo dos latossolos, adsorvem mais F^- que aqueles cujos minerais pertencem ao grupo da montmorilonita e da vermiculita, promovendo maior liberação de OH^- (BOWER; HATCHER, 1967; POGGERE et al., 2016).

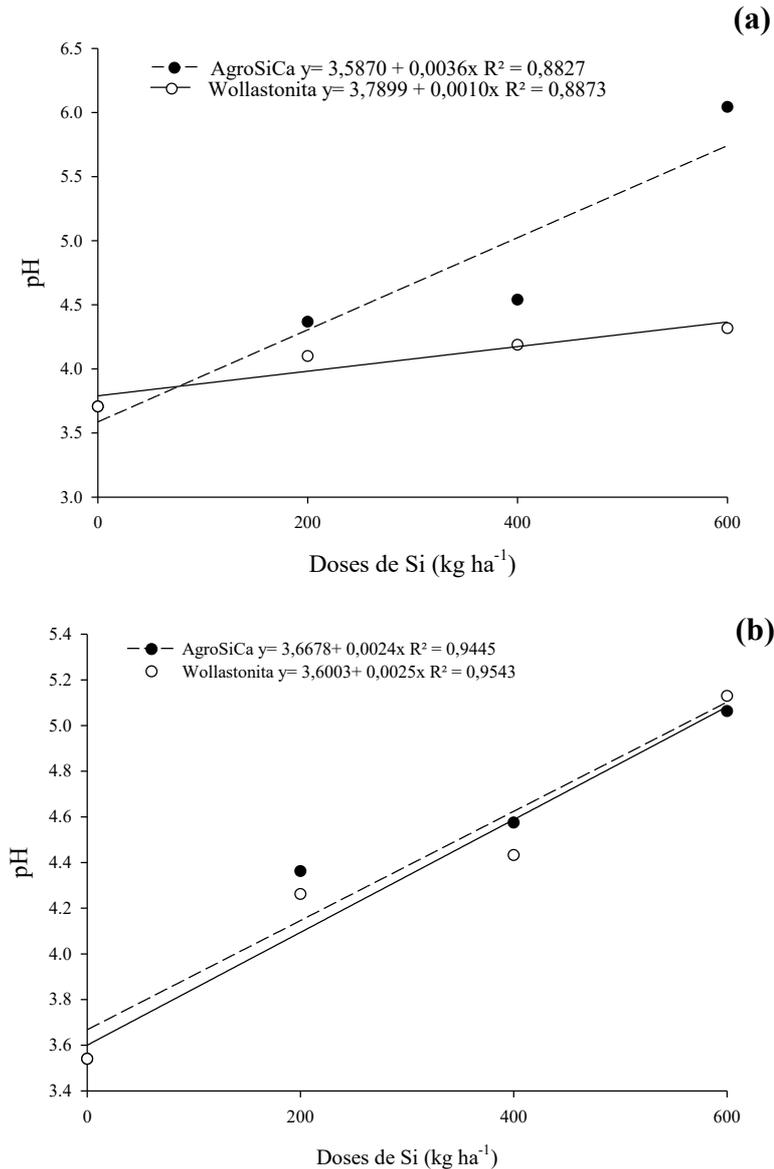


FIGURA 2. Efeito de doses crescentes de Si nos valores de pH em LVd (a) e RQo (b)

Ressalta-se ainda que a aplicação das fontes silicatadas promoveu efeitos benéficos quanto aos teores de Al trocável nos solos. De modo geral, em solos com valores de pH inferiores a 5,0, como os solos utilizados neste estudo, o Al trocável pode ser considerado o principal fator limitante da produção agrícola (KOCHIAN, 2005).

Observa-se que o aumento das doses de Si através do uso de ambas as fontes promoveu decréscimos lineares nos teores de Al no solo (Figura 3). No caso do AgroSiCa, a cada 414 mg dm⁻³ da fonte aplicados (que equivale a 100 kg ha⁻¹ de Si), obtiveram-se decréscimos de 0,12 cmol_c dm⁻³ de Al trocável em ambos os solos utilizados.

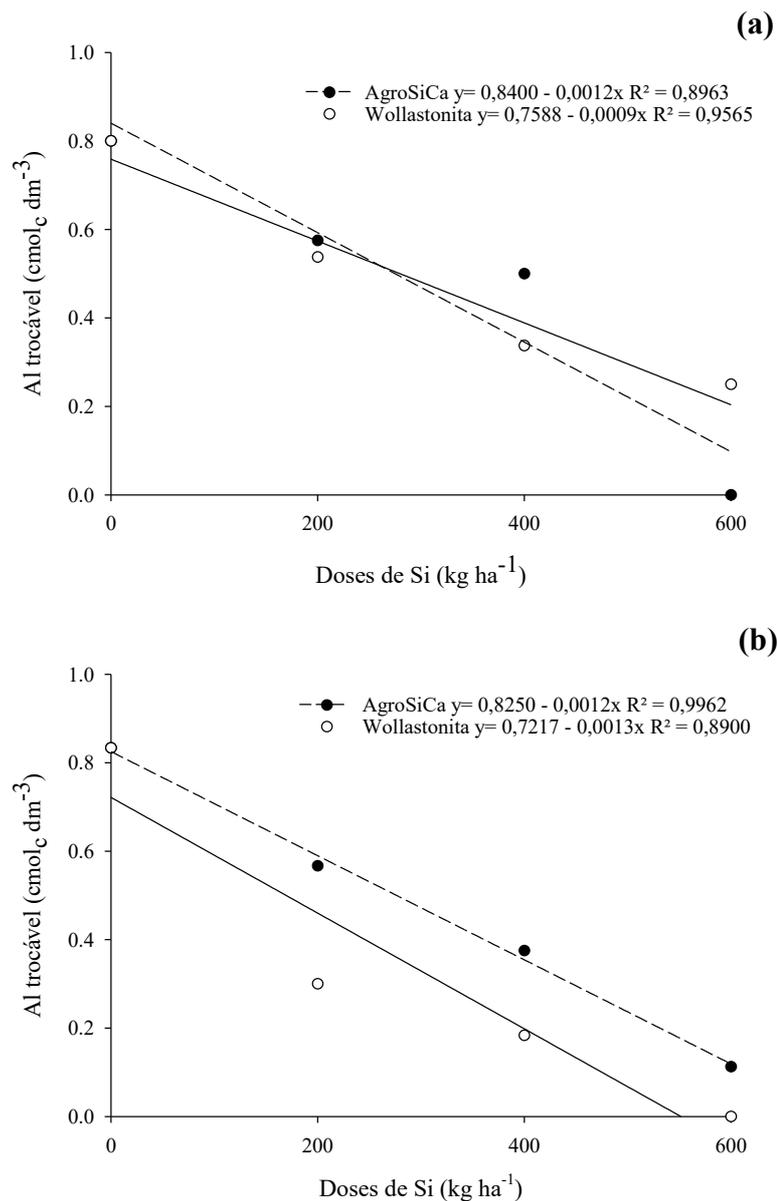


FIGURA 3. Efeito de doses crescentes de Si nos teores de Al trocável em LVd (a) e RQo (b)

Assim como para o pH, a redução dos teores de Al trocável se dá pelo aumento da concentração de ânions OH⁻ na solução do solo com a aplicação de fontes silicatadas. Dessa forma, parte das hidroxilas reage com o excesso de H⁺ em solução e parte promove a precipitação do alumínio na forma insolúvel Al(OH)₃, não tóxica às plantas (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; SADE et al., 2016).

Ademais, a aplicação da maior dose do subproduto (600 kg ha⁻¹ de Si), em LVd, anulou os teores de Al trocável nesses solos (Tabela 6). Isto pode ser explicado, novamente, pela presença de F neste subproduto. O F é o elemento que apresenta maior reatividade entre todos os não-metálicos (BATTALEB-LOOIE; MOORE, 2010), o qual

reage com substâncias orgânicas e inorgânicas e forma, com o Al, compostos de alta estabilidade. Cameron et al. (1986), avaliando a influência de diferentes íons na redução de Al tóxicos nos solos, verificaram que o ânion F^- formou rapidamente complexos com Al, diminuindo sua toxicidade e apresentando maior eficiência que o SiO_3^{2-} . Neste sentido, segundo Whitten e Ritchie (1991), o Al complexado com ligantes como fluoreto não é considerado fitotóxico para as plantas.

TABELA 6. Al trocável ($KCl - 1 \text{ mol L}^{-1}$) nos solos em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si ($kg \text{ ha}^{-1}$)	LVd		RQo	
	AgroSiCa	Wollastonita	AgroSiCa	Wollastonita
0	0,80		0,83	
200	0,57 A*	0,54 A*	0,57* B	0,30* A
400	0,50* B	0,34* A	0,38* B	0,18* A
600	0,00* A	0,25* B	0,11* B	0,00* A
Média	0,36	0,38	0,35	0,16

LVd: DMS Tukey: 0,06; DMS Dunnet: 0,08; CV (%): 9,69 - RQo: DMS Tukey: 0,08; DMS Dunnet: 0,12; CV (%): 16,35

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

A influência do Si na disponibilidade de P foi avaliada, de forma indireta, ao se analisar os teores de P disponível após a aplicação das fontes silicatadas. Para os dois solos estudados, os teores de P disponível aumentaram ao se aplicar ambas as fontes de Si (Tabela 7). O ânion silicato compete com o fosfato pelos mesmos sítios de adsorção do solo (FASSBENDER, 1987). Assim, a adição de Si ao solo promove, inicialmente, um aumento nos teores de ácido monossilícico na solução do solo. Desta forma, nota-se a presença, em maiores quantidades, do ânion silicato ocasionando a maior disponibilidade do ânion fosfato, uma vez que os mesmos competem pelos sítios de adsorção. Esta reação resulta em maior disponibilidade de P na solução do solo (MATICHENKOV; AMMOSOVA, 1996), fato que pode explicar os resultados observados neste estudo.

TABELA 7. Teores de P disponível (Mehlich-1) nos solos em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha ⁻¹)	LVd		RQo	
	AgroSiCa	Wollastonita	AgroSiCa	Wollastonita
0	0,15		3,1	
200	0,6 A	0,6 A	4,7*	3,6
400	1,4* A	0,8* B	5,7*	5,6*
600	1,3* A	0,3 B	6,7*	4,8*
Média	1,1	0,6	5,7 A	4,3 B

LVd: DMS Tukey: 0,1; DMS Dunnet: 0,5; CV (%): 33,9 - RQo: DMS Dunnet: 0,8; CV (%): 8,4.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Ressalta-se ainda que a maior disponibilidade de P pode estar associada ao aumento do pH proporcionado pelas fontes. Com o aumento do pH, as cargas das partículas do solo tornam-se mais negativas, diminuindo a adsorção de fosfato (POSNER; BOWDEN, 1980; SOUZA et al., 2006).

Por outro lado, apesar dos aumentos nos teores de P terem sido observados em ambos os solos estudados, nota-se incrementos proporcionalmente maiores no LVd (textura argilosa). Neste caso, a aplicação da maior dose de Si (600 kg ha⁻¹ de Si) resultou em teores de P disponível 9 e 2 vezes superiores ao tratamento controle (0,15 mg dm⁻³ de P) ao se aplicar o AgroSiCa e a Wollastonita, respectivamente (Tabela 7). Já para o RQo, observaram-se acréscimos de aproximadamente 2 vezes ao se aplicar o AgroSiCa e 1,5 vezes ao aplicar a Wollastonita, quando comparados ao controle (3,1 mg dm⁻³ de P) (Tabela 7).

Os Latossolos apresentam, em geral, óxidos de ferro e alumínio e argilas do grupo da caulinita como principais constituintes da fração argila (VOLKWEISS; RAIJ, 1976). Assim, estes solos possuem, preferencialmente, cargas positivas, tornando-os capazes de reter em suas superfícies vários tipos de ânions, com predomínio de íons fosfatos (VALLADARES et al., 2003). Dessa forma, pode-se observar uma maior influência do Si em disponibilizar P para a solução em solos com maior capacidade de adsorção de P, a exemplo dos Latossolos.

A utilização do subproduto da indústria fosfatada resultou em maiores teores de P disponível quando comparado à Wollastonita (Tabela 7). Para o solo de textura argilosa, no qual houve interação significativa entre as fontes e as doses aplicadas, observa-se que a aplicação do AgroSiCa nas doses de 400 e 600 kg ha⁻¹ de Si resultou em maiores teores de P disponível em relação à Wollastonita aplicada nas mesmas doses.

Como ambas as fontes foram aplicadas visando disponibilizar os mesmos teores de Si e também foram eficientes em aumentar o pH do solo, os aumentos mais expressivos proporcionados pelo AgroSiCa podem estar relacionados à presença de F no subproduto. Os óxidos de Al são os constituintes da fração argila mais efetivos na adsorção de P (PARFITT, 1978). Dessa forma, a utilização de fontes que contêm F pode ocasionar a formação de complexos Al-F, diminuindo a adsorção de P aos óxidos de Al e aumentando a sua disponibilidade na solução do solo.

De modo geral, o aumento das doses de AgroSiCa promoveu acréscimos lineares nos teores de P disponível no solo, uma vez que a cada 414 mg dm^{-3} do subproduto aplicado, $0,2$ e $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$ de P são disponibilizados ao solo de textura argilosa e arenosa, respectivamente (Figura 4).

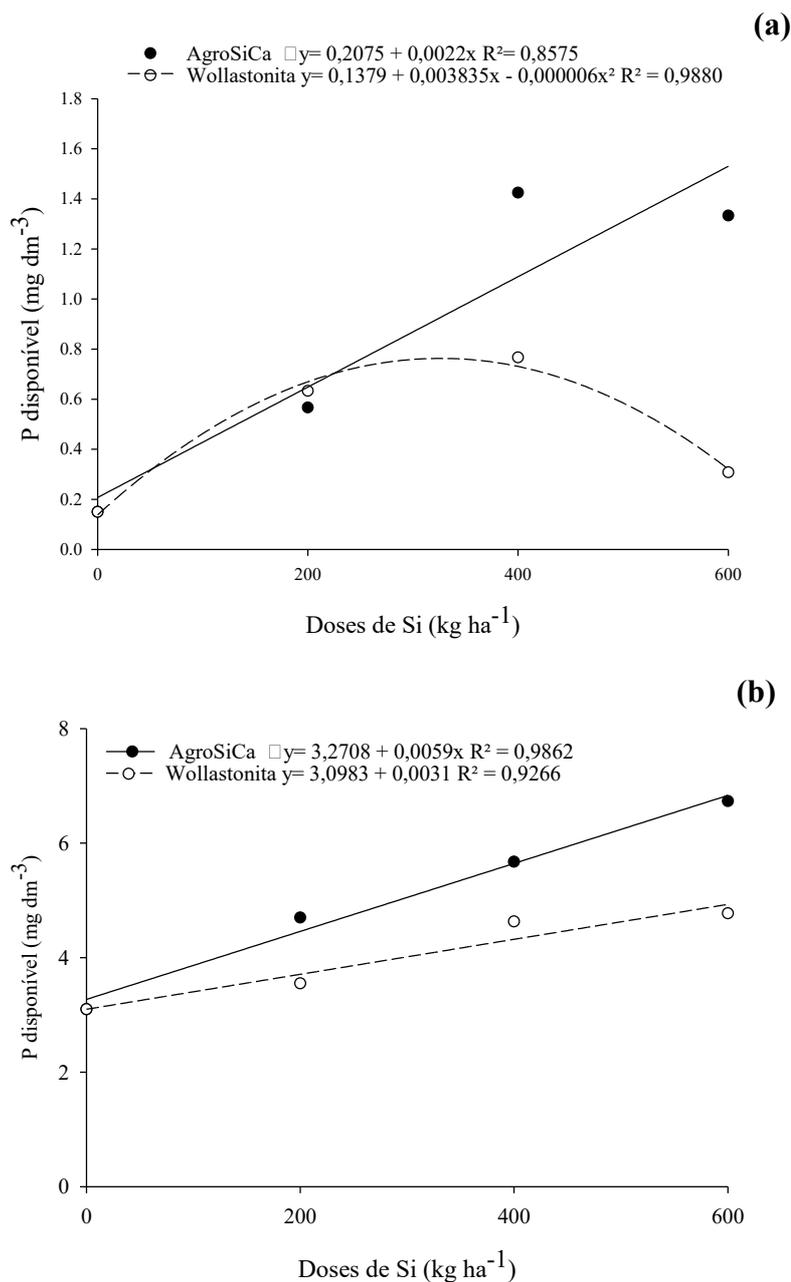


FIGURA 4. Efeito de doses crescentes de Si nos teores de P disponível em LVd (a) e RQo (b)

Uma vez que foram observados efeitos da aplicação de fontes de Si na disponibilidade de P nos solos, relacionando-os à possível competição de elementos pelos sítios de adsorção, realizou-se a representação matemática dos mecanismos de adsorção de P no solo. Dessa forma, optou-se pela equação de Langmuir, a qual fornece um parâmetro quantitativo, relacionado à capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP), e um qualitativo, que expressa a energia de adsorção de P ao solo (a) (SOARES et al., 2006).

Os valores absolutos da CMAP, obtidos a partir das isotermas de Langmuir linearizadas, variaram de 341 mg dm⁻³ a 1.396 mg dm⁻³, com maiores valores no solo LVd (Tabela 8). Estes resultados reafirmam a associação da maior adsorção de P em solos mais intemperizados e com maiores teores de argilas (NOVAIS; SMITH, 1999).

TABELA 8. Parâmetros das isotermas de Langmuir para os solos do presente estudo submetidos à diferentes doses de Si

Doses de Si (kg ha ⁻¹)	LVd			RQo		
	Equação	CMAP ⁽¹⁾	R ²	Equação	CMAP ⁽¹⁾	R ²
0	y = 0,716x + 5,19	1.406	96%	y = 2,392x + 91,49	418	98%
AgroSiCa						
200	y = 0,740x + 6,49	1.352*	95%	y = 2,932x + 120,92	341	98%
400	y = 0,743x + 5,85	1.346*	98%	y = 2,506x + 164,58	399	96%
600	y = 0,769x + 4,16	1.301*	99%	y = 2,509x + 101,26	399	96%
Wollastonita						
200	y = 0,714x + 5,78	1.401	92%	y = 2,405x + 100,25	416	92%
400	y = 0,732x + 4,65	1.366	96%	y = 2,718x + 87,14	368	98%
600	y = 0,743x + 4,09	1.345*	97%	y = 2,565x + 82,90	390	98%

⁽¹⁾ CMAP: capacidade máxima de adsorção de P (mg dm⁻³). * Diferem da testemunha pelo teste de Dunnet à 0,05 de significância. DMS_{Dunnet}: 39,46.

Quanto ao efeito das doses dos produtos, ressalta-se que, em geral, o aumento das doses proporcionou decréscimos lineares nos valores de CMAP (Figura 5). Pozza et al. (2007), quantificando a adsorção e dessorção competitivas dos ânions nitrato, sulfato, silicato e fosfato na fração argila, observaram que o fosfato tem capacidade de deslocar o silício adsorvido à superfície da gibbsita e vice-versa. Além disso, os mesmos autores afirmam que a prévia aplicação de silício, seguida da aplicação de mesma quantidade de fosfato, reduz 40,9% da adsorção de fosfato à gibbsita, indicando a importância da sequência de aplicação destes elementos no manejo da fertilidade de solos tropicais altamente intemperizados. Neste sentido, a aplicação de Si promove a diminuição do P adsorvido, diminuindo a CMAP e aumentando as concentrações do elemento na solução do solo (ROY et al., 1971, citado por ÁVILA, 2016).

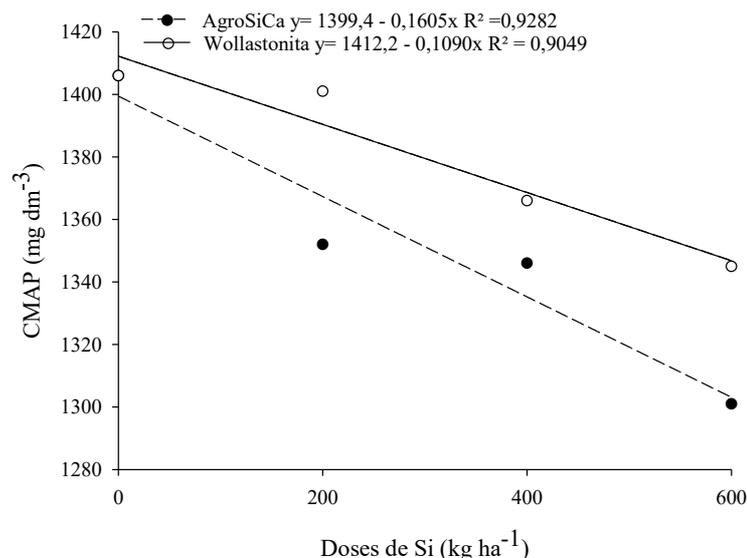


FIGURA 5. Efeito de doses crescentes de Si nos valores de CMAP em LVd

Em geral, a aplicação da maior dose das fontes (600 kg ha⁻¹ de Si) resultou em diminuição de 105 mg dm⁻³ e 61 mg dm⁻³ nos valores da CMAP, em relação à testemunha, ao se adicionar o AgroSiCa e a Wollastonita ao solo de textura argilosa, respectivamente. Os menores valores da CMAP observados com a aplicação do AgroSiCa confirmam a interferência do F na menor adsorção de P nos solos. Assim, a presença de íons fluoreto diminuem a adsorção de P devido à competição dos íons pelos sítios ativos, às mudanças de pH pela dissociação de hidroxilas na presença de F ou por ambos os processos (MOUELHI et al., 2016).

Os teores de Si disponível nos solos após o período de incubação com as fontes estão apresentados na tabela 9. Em geral, nota-se que a aplicação de quaisquer doses das fontes promoveu teores de Si no solo superiores à testemunha.

TABELA 9. Teores de Si disponível (CaCl₂ - 0,01 mol L⁻¹) nos solos em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha ⁻¹)	LVd		RQo	
	AgroSiCa	Wollastonita	AgroSiCa	Wollastonita
0	5,21		2,54	
200	8,42* A	7,68* A	4,28* B	5,80* A
400	9,18* A	9,85* A	4,72* B	7,86* A
600	9,63* B	14,97* A	5,27* B	6,93* A
Média	9,1	10,8	4,7	6,8
Eq. SiCa (%)	100,9		45,6	

LVd: DMS Tukey: 0,8; DMS Dunnet: 1,1; CV (%): 6,2 - RQo: DMS Tukey: 0,7; DMS Dunnet: 0,9; CV (%): 8,9

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Para o solo de textura argilosa, a aplicação do AgroSiCa nas doses 200 e 400 kg ha⁻¹ de Si resultou em teores de Si disponível semelhantes à Wollastonita. Tais resultados demonstram a alta reatividade do subproduto da indústria fosfatada, uma vez que disponibilizou quantidades semelhantes à Wollastonita, que é um silicato de cálcio natural (CaSiO₃), com alto grau de pureza e mundialmente utilizado como padrão para experimentos com Si (RAMOS et al., 2006). Por outro lado, para o solo de textura arenosa, maiores teores de Si foram observados com a aplicação da Wollastonita.

Quanto às porcentagens de "Eq. SiCa" do AgroSiCa, obtiveram-se valores iguais a 100,9% e 45,6% para o LVd e o RQo, respectivamente (Tabela 9). Assim, pode-se afirmar que o subproduto da indústria fosfatada está apto para ser registrado como fonte de Si, conforme protocolo estabelecido pelo MAPA (MAPA, 2012), uma vez que foram observados valores superiores a 45% para ambos os solos utilizados no experimento.

Observa-se ainda que o aumento das doses do AgroSiCa resultou em acréscimos lineares nos teores de Si disponível em ambos os solos (Figura 6). Dessa forma, ressalta-se que a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de Si (410 mg dm⁻³ do AgroSiCa), em LVd e RQo, promoveu aumentos de 0,7 e 0,4 mg dm⁻³ de Si disponível, respectivamente.

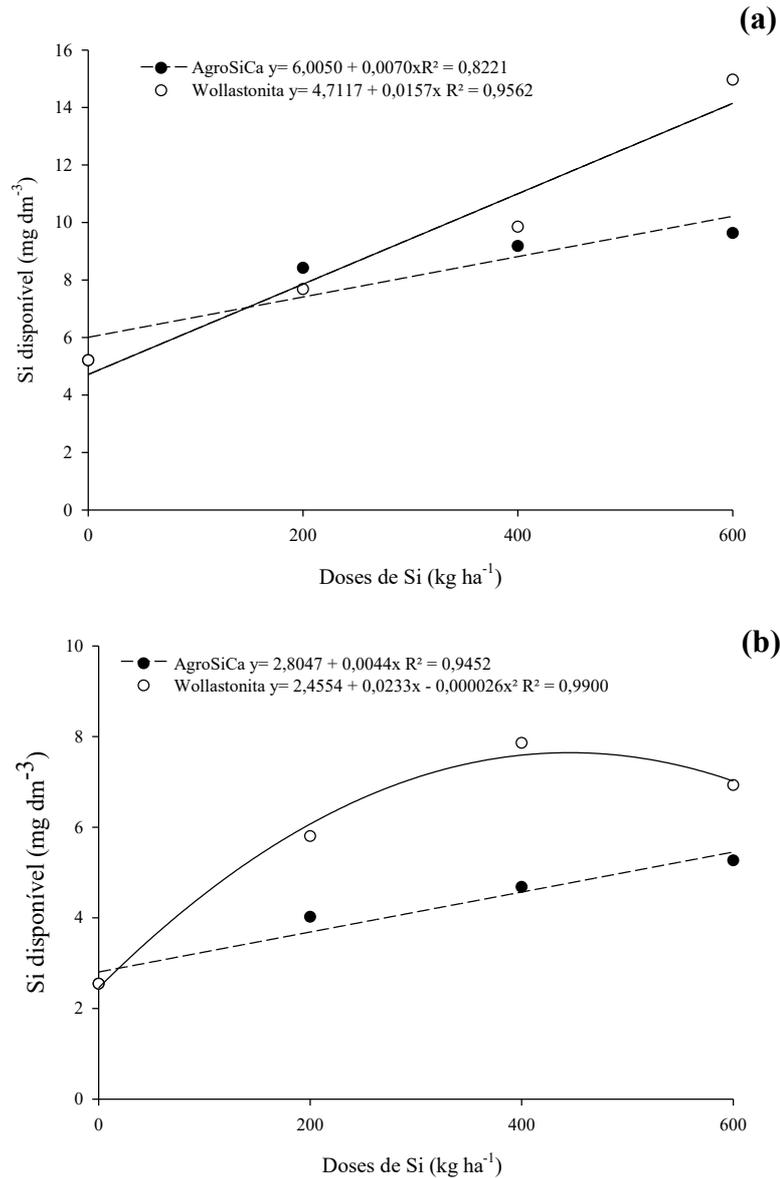


FIGURA 2. Efeito de doses crescentes de Si nos teores de Si disponível em LVd (a) e RQo (b)

Quanto aos teores de Ca trocável nos solos após os 60 dias de incubação, observam-se que ambas as fontes aumentaram os teores deste elemento nos solos (Tabela 10). A utilização da maior dose do AgroSiCa promoveu aumentos de 4,8 e 3,2 vezes em relação à testemunha quando aplicado em LVd e RQo, respectivamente. Ressalta-se ainda que esses aumentos, especialmente para o LVd, promoveram mudanças na classe de interpretação da fertilidade do solo, passando de níveis baixos (0,41-1,20 cmol_c dm⁻³) para bons (2,41 - 4,0 cmol_c dm⁻³), ou seja, acima do nível crítico do elemento para a maioria das culturas (RIBEIRO et al., 1999).

Verifica-se ainda que o AgroSiCa proporcionou, de modo geral, maiores teores de Ca trocável que a Wollastonita no solo LVd (Tabela 10). Tal fato reforça o potencial de uso agrícola deste subproduto, visto que o Ca é um elemento altamente requerido pelas culturas.

TABELA 10. Teores de Ca trocável (KCl – 1 mol L⁻¹) nos solos em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha ⁻¹)	LVd		RQo	
	AgroSiCa	Wollastonita	AgroSiCa	Wollastonita
0		0,60		0,63
200	1,0	0,7	0,9* A	0,8 A
400	1,8*	1,3*	1,3* A	1,4* A
600	2,9*	1,9*	2,0* B	2,5* A
Média	1,9 A	1,3 B	1,4	1,6

LVd: DMS Dunnet: 0,5; CV (%): 19,0 - RQo: DMS Tukey: 0,2 DMS Dunnet: 0,2; CV (%): 8,7.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Observa-se pela figura 7, que à medida que se aumentaram as doses de Si, houve também acréscimos lineares nos teores de Ca nos solos, para ambas as fontes. Dessa forma, a aplicação de 414 mg dm⁻³ do AgroSiCa resultou em acréscimos de 0,4 mg dm⁻³ de Ca no solo de textura argilosa e 0,2 mg dm⁻³ de Ca no solo de textura arenosa.

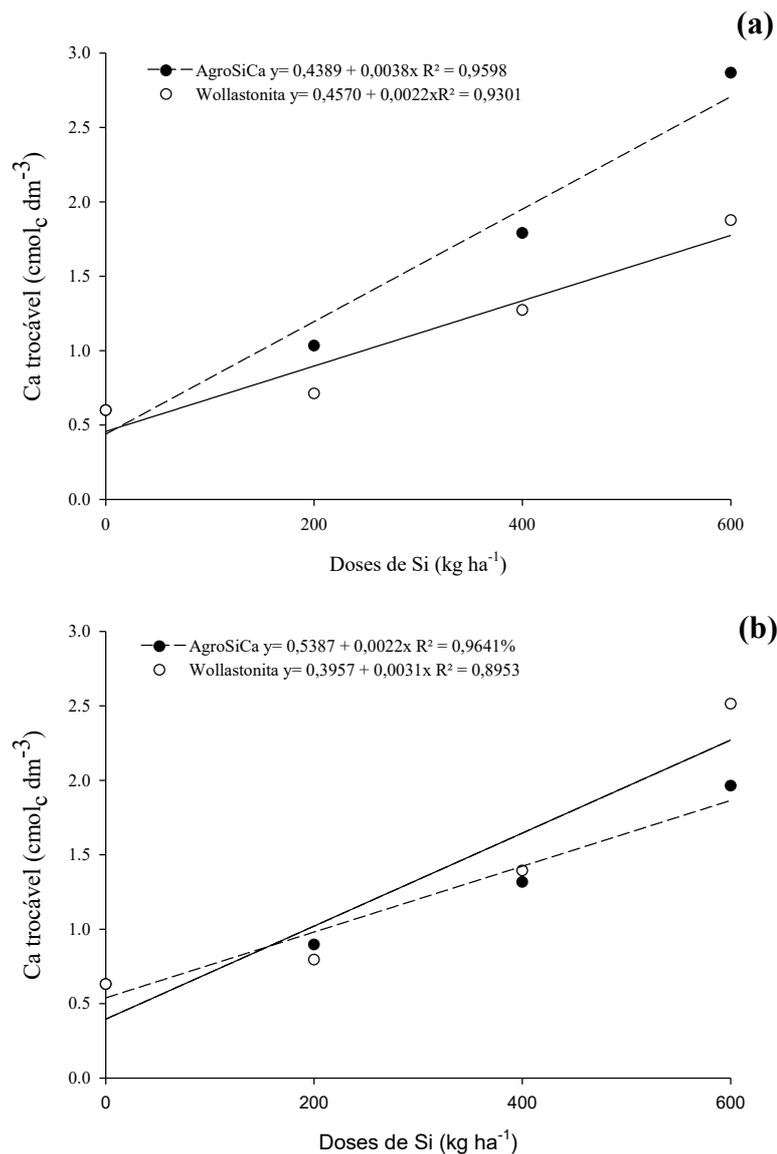


FIGURA 7. Efeito de doses crescentes de Si nos teores de Ca trocável em LVd (a) e RQo (b)

Por fim, vale ressaltar que a maior dose do AgroSiCa, que corresponde a 600 kg ha^{-1} de Si, disponibilizou $2,3$ e $1,37 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca, em LVd e RQo, respectivamente. Estes números demonstram, mais uma vez, o potencial de uso agrícola do AgroSiCa, uma vez que a cada 1000 kg de um calcário, com 60% de CaO, aplicados à uma camada de 20 cm de solo, por exemplo, $1,07 \text{ cmol}_c$ de Ca são fornecidos ao solo, lembrando-se ainda que nem todo o Ca adicionado ficará disponível para as plantas.

4. CONCLUSÕES

O subproduto da indústria fosfatada promove diversas melhorias às características químicas dos solos tropicais. Maiores valores de pH, menores teores de Al trocável e tóxico às plantas e incrementos nos teores de P, Ca e Si nos solos são observados com a utilização do AgroSiCa.

Os maiores valores de pH e a diminuição dos teores de Al trocável nos solos estão associados à presença de Si e F na fonte. Além disso, a disponibilização destes elementos pela fonte promove, mesmo que em pequena magnitude, a diminuição dos valores de CMAP em LVd, reduzindo a adsorção de P nos solos e aumentando a disponibilidade deste macronutriente para as plantas.

A utilização do subproduto também resulta em maiores teores de Si disponível nos solos e em eficiência agronômica comparável a de fontes padrão de Si, estando apto para ser registrado como fonte de Si pelo MAPA.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, F. C. S. **Efeito do fluor sobre o aluminio e o fosforo em um podzolic vermelho-amarelo e sua acumulacao em algumas especies vegetais**. 1997. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1997.
- ÁVILA, M. A. P. **Influência do silício sobre a difusão do fósforo no solo e na eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados granulados**. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- BATTALEB-LOOIE, S.; MOORE, F. A study of fluoride occurrence in Posht-e-Kooh-e-Dashtestan, South of Iran. **World Applied Sciences Journal**, v. 8, p. 1317–1321, 2010.
- BOWER, C. A.; HATCHER, J. J. Adsorption of fluoride by soils and minerals. **Soil Science**, Philadelphia, v. 103, p. 151-154, 1967. <https://doi.org/10.1097/00010694-196703000-00001>
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B.V. Relações entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: I - Trabalhos de laboratório. **Ceres**, São Paulo, v. 19, p. 124-136, 1972.
- CAMERON, R. S.; RITCHIE, G S. P.; ROBSON, A. D. Relative toxicities of inorganic aluminium complexes to barley. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, p. 1231-1236, 1986. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050029x>
- CRONIN, S. J.; MANOHARAN, V.; HEDLEY, M. J.; LOGANATHAN, P. Fluoride: a review of its fate, bioavailability and risks of fluorosis in grazed-pasture systems in New Zealand. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 43, p. 295-321, 2000. <https://doi.org/10.1080/00288233.2000.9513430>
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009. 412 p.
- FASSBENDER, H. W. **Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina**. 2. ed. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para Agricultura, 1987. 420p.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, p. 109-112, 2014.
- FLÜHLER, H.; POLOMSKI, J.; BLASER, P. Retention and movement of fluoride in soils. **Journal of Environment Quality**, Madison, v. 11, n. 3, p. 414-468, 1982.

EYDE, B. Determination of acid soluble fluoride in soils by means of an ion selective electrode. **Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie**, Berlin, v. 316, p. 299-301, 1983.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (IPNI). **Evolução do consumo aparente de N, P, K e Total de NPK no Brasil**, 2016. Disponível em: <<http://brasil.ipni.net/article/BRS-3132#evolucao>>. Acesso: 29 de dez. 2017.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 315 p.

KOCHIAN, L. V.; PINEROS, M.A.; HOEKENGA, O. A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. **Plant and Soil**, v. 274, p. 175–195, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-1158-7>

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, n. 70, p. 1-3, 1995.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**, 2004a. Disponível em: <http://www.nutricaoeplantas.agr.br/site/downloads/bt2_gpsi.pdf>. Acesso em: 29 de dez. 2017.

KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A.; OLIVEIRA, L. A. **Silício no solo e na planta**. 2. ed. UFU-GPSi-ICIAG, Uberlândia, 2004b. (Boletim Técnico). Disponível em: <http://www.dpv24.iciag.ufu.br/Silicio/Fontes%20de%20Si/fontes.htm>. Acesso em: 10 de novembro de 2017.

MATICHENKOV, R. V.; AMMOSOVA, Y. M. Effect of amorphous silica on soil properties of a sod-podzolic soil. **Eurasian Soil Science**, Moskva, v. 28, n. 10, p. 87-99, 1996.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Solubilidade de fertilizantes contendo silício - método incubação**, 2012. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 18 de outubro de 2017.

MOUELHI, M.; GIRAUDET, S.; AMRANE, A.; HAMROUNI, B. Competitive Adsorption of Fluoride and Natural Organic Matter onto Activated Alumina. **Environmental Technology**, Hertfordshire, v. 37, p. 2326–2336, 2016. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1149521>

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single-solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31–36, 1962. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)

NOLLA, A.; KORNDORFER, G. H.; ARRUDA, D. G.; LEMES, E. M.; KAHLAU, J. Eficiência de silicato de cálcio e calcário no controle de cercospora sojina na cultura da soja. In: SIMPÓSIO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, Uberlândia, 2014. **Anais...** Uberlândia: Grupo de pesquisa em silício na agricultura, 2004. Disponível em:

<http://silifertil.com.br/download-de-artigos/eficiencia.pdf>. Acesso em: 10 de novembro de 2017.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.F .; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 471-550, 2007.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, v. 38, p. 47- 57, 1996. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(96\)01021-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01021-5)

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soils materials. **Advances in Agronomy**, v. 30, p. 1-50, 1978.

PERROTT, K. W.; SMITH, B. F. L.; INKSON, H.E. The reaction of fluoride with soils and soil minerals. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 27, p. 58-67, 1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1976.tb01975.x>

POGGERE, G. C.; MELO, V. F.; FRANCELINO, M. R.; SCHARFER, C. E.; SIMAS, F. N. Characterization of products of the early stages of pedogenesis in ornithogenic soil from Maritime Antarctica. **European Journal of Soil Science**, v. 67, p. 70-78, 2016. <https://doi.org/10.1111/ejss.12307>

POSNER, A. M.; BOWDEN, J. W. Adsorption isotherms: should they be split. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.31, p.1-10, 1980.

POZZA, A. A. A.; CURI, N.; COSTA, E. T. S.; GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J. G. S. M.; MOTTA, P. E. F.; R. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 11, p. 1627-1633, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001100015>

RAMOS, L. A.; NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 849-857, 2006.

RIBEIRO, A. C.; GUIMRÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**, 5ª Aproximação. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 359 p.

SADE, H.; MERIGA, B.,; SURAPU, V.; GADI, J.; SUNITA, M. S.; SURAVAJHALA P.; KISHOR, P. B. K. Toxicity and tolerance of aluminum in plants: tailoring plants to suit to acid soils. **Biometals**, v. 29, p. 187–210, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10534-016-9910-z>

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 3733-3740, 2016.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F. Modelos descritivos da adsorção de íons em solos. **B. Inf. SBCS**, Viçosa, v. 31, p. 46-50, 2006.

SODRÉ, F. F.; LENZI, E.; COSTA, A. C. Applicability of adsorption models to the study of copper behaviour in clayey soils. **Química Nova**, São Paulo, v. 24, p. 324–330, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422001000300008>

SOUSA, J. V.; RODRIGUES, C. R.; LUZ, J. M. Q.; CARVALHO, P. C.; RODRIGUES, T. M.; BRITO, C. H.; Silicato de Potássio via foliar no milho: Fotossíntese, Crescimento e Produtividade. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 4, p. 502-513, 2010.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; TORRES, P. R. F.; BALIZA, D. P. Calagem e adubação orgânica: Influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 975-983, 2006.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

VALDIVIESO, A. L.; BAHENA, J. L. R.; SONG, S.; URBINA, R. H. Temperature effect on the zeta potential and fluoride adsorption at the α -Al₂O₃/aqueous solution interface. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 298, p. 1-5, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.11.060>

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Phosphate sorption in low activity clay soils. **Bragantia**, Campinas, v. 62, p. 111-118, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052003000100014>

VALLE, L. A. R.; RODRIGUES, S. L.; RAMOS, S. J.; PEREIRA, H. S.; AMARAL, D. C.; SIQUEIRA, J. O.; GUILHERME, L. R. G. Beneficial use of a by-product from the phosphate fertilizer industry in tropical soils: effects on soil properties and maize and soybean growth. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 112, p. 113-120, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.037>

WHITTEN, M. G.; RITCHIE, G. S. P. Soil tests for aluminium toxicity in the presence of organic matter: laboratory development and assessment. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Athens, v. 22, n. 3-4, p. 343-368, 1991. <https://doi.org/10.1080/00103629109368421>

VOLKWEISS, S. J.; RAIJ, B. V. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: SIMPÓSIO SOBRE CERRADO. Brasília. Bases para utilização agropecuária. **Anais...** São Paulo: EDUSP, p.317-332, 1976.

YOU, S. H.; RHEE, K.; LEE, C. K.; YANG, D. Two-Step ammoniation of by-product fluosilicic acid to produce high quality amorphous silica. **Korea Journal of Chemical Engineering**, v. 17, p. 401-408, 2000. <https://doi.org/10.1007/BF02706850>

CAPÍTULO 2

RESUMO

GUALBERTO, CAMILA DE ANDRADE CARVALHO. **Subprodutos industriais como fontes de silício para a cultura do arroz irrigado por inundação**. Uberlândia: UFU, 2018. 27p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.⁵

Os subprodutos industriais são gerados em praticamente todos os setores produtivos, a exemplo das indústrias siderúrgicas e de fabricação de fertilizantes fosfatados. A reutilização de subprodutos industriais na agricultura como fontes de Si é uma alternativa viável para minimizar os possíveis impactos ambientais causados pelo indevido descarte desses produtos. Objetivou-se, com este trabalho, avaliar a eficiência de subprodutos industriais, um agregado siderúrgico e um subproduto da indústria fosfatada, como fontes de Si para a cultura do arroz irrigado por inundação. O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia - MG, Brasil. Utilizou-se, além do subproduto da siderurgia (EAA) e da indústria de fertilizantes fosfatados (AG), uma fonte de Si considerada padrão (Wollastonita - CaSiO_3) para fins de comparação. As fontes foram incubadas por 60 dias em dois tipos de solo, sendo um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd) (69% de argila) e um NEOSSOLO QUARTZARENICO Órtico típico (RQo) (9% de argila), nas doses de 0, 200, 400 e 600 kg ha⁻¹ de Si. Após o período de incubação, realizou-se a semeadura das plantas de arroz e uma lâmina d'água foi mantida durante o ciclo de cultivo. Aos 89 dias após a semeadura, as plantas de arroz foram colhidas e a matéria seca da parte aérea (MSPA) foi quantificada, bem como os teores de Si, Ca e P acumulados na parte aérea. Também foi realizada a coleta de amostras de solo para as análises de Si, Ca e P. Os subprodutos foram eficientes em aumentar os valores de MSPA, Si, Ca e P nas amostras de solo e acumulados na parte aérea de plantas de arroz. De modo geral, o subproduto da indústria fosfatada promoveu maiores acúmulos dos nutrientes nas plantas.

Palavras-chave: Agregados siderúrgicos, indústria fosfatada, fertilizantes silicatados, *Oryza sativa* L.

⁵ Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU.

Coorientadores: Hamilton Seron Pereira – UFU e Luiz Roberto Guimarães Guilherme - UFLA.

ABSTRACT

GUALBERTO, CAMILA DE ANDRADE CARVALHO. **Industrial by-products as silicon sources for flooded rice.** Uberlândia: UFU, 2018. 27p. Dissertation (Masters in Agronomy/Soil Science) - Federal University of Uberlândia, Uberlândia.⁶

Industrial by-products are generated in almost all productive sectors, such as the steel and phosphate fertilizer industries. The reuse of industrial by-products in agriculture as Si sources is a viable alternative to minimize possible environmental impacts caused by improper disposal of these products. The objective of this study was to evaluate the efficiency of industrial by-products, a steel aggregate and a by-product from the phosphate fertilizer industry, as Si sources for flooded rice. The experiment was carried out under greenhouse conditions at the Institute of Agricultural Sciences (ICIAG) at Federal University of Uberlândia (UFU), Uberlândia - MG, Brazil. A standard source of Si (Wollastonite - CaSiO_3) was used in addition to by-products. The sources were incubated for 60 days on two soil types, a Typic Dystrustox (LVd) (69% of clay) and a Typic Quartzipsamment (RQo) (9% of clay) at different Si doses (0, 200, 400 and 600 kg ha^{-1} of Si). After the incubation period, rice plants were grown under flooded conditions. At 89 days after sowing, the rice plants were harvested and dry matter (DM), Si, Ca and P contents were quantified. Soil samples were also collected for Si, Ca and P analysis. The application of both by-products resulted in an increase of DM, as well as Si, Ca and P contents in soil samples and in rice plants. In general, the by-product from the phosphate fertilizer industry promoted greater nutrient accumulation in plants.

Keywords: Steel aggregate, phosphate industry, silicate fertilizers, *Oryza sativa* L.

⁶ Advisor: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU.

Co-Advisors: Hamilton Seron Pereira – UFU and Luiz Roberto Guimarães Guilherme - UFLA.

1. INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica vem ocupando, historicamente, um papel de destaque na economia brasileira. O setor é um dos mais importantes da produção nacional, não só por atuar como fornecedor para diversos setores da atividade econômica, como também por estar presente na maioria das cadeias produtivas. Segundo dados do Instituto Aço Brasil (2017), a produção de aço bruto no país no período de janeiro a setembro de 2017 foi de aproximadamente 25,5 milhões de toneladas, com acréscimos de 9,1% quando comparada ao mesmo período de 2016.

No entanto, a crescente atividade siderúrgica tem resultado em aumentos na geração de subprodutos. De modo geral, para cada tonelada de aço produzida, obtêm-se, em média, 600 kg de agregados siderúrgicos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017), os quais são acumulados nos pátios das indústrias, resultando em um possível problema ambiental.

Um outro setor industrial que tem apresentado um grande crescimento nos últimos anos e, conseqüentemente, intensa geração de subprodutos, é o de processamento de rochas para a produção de fertilizantes. Um exemplo é a acidulação de fosfatos para a produção de fontes solúveis de fósforo (P), a qual produz, como subproduto, o ácido hexafluorossilícico (H_2SiF_6). Este ácido pode ser reaproveitado por indústrias químicas ou de metalurgia, no entanto, a comercialização deste subproduto está aquém dos volumes produzidos (VALLE, 2016).

Neste sentido, tornam-se necessárias iniciativas que visem à correta destinação dos subprodutos obtidos nos setores industriais. Pires e Mattiazzo (2008) afirmam que, dentre as opções de disposição final, a reutilização de subprodutos é a mais interessante, seja do ponto de vista econômico, ambiental ou social. A utilização de subprodutos industriais na agricultura como fonte de nutrientes, a exemplo daqueles originados na siderurgia (MARCIANO et al., 2001) e na indústria de fertilizantes (VALLE et al., 2016), é uma alternativa para minimizar os efeitos negativos do acúmulo de resíduos nos centros de produção. Estes materiais podem ser utilizados na agricultura, principalmente como fornecedores de cálcio (Ca) e silício (Si) para as culturas ou como corretivo da acidez do solo (ARAÚJO & NASCIMENTO, 2005; CORRÊA et al., 2007).

Por apresentarem em sua composição quantidades expressivas de Si, os agregados siderúrgicos podem ser utilizados como fonte deste elemento para as plantas,

uma vez que os cultivos consecutivos reduzem a concentração do elemento no solo (PRADO; KORNDORFER, 2003). Ademais, o ácido fluorsilícico gerado na acidulação de fosfatos para fertilizantes também é considerado uma grande fonte de Si (BLAKE; STICKNEY, 1966, citado por YU et al., 2000), apresentando, após transformação/beneficiamento, grande potencial de uso agrícola em solos tropicais (VALLE, 2016).

Os efeitos benéficos do Si têm sido demonstrados em várias espécies vegetais, especialmente quando essas plantas são submetidas a algum tipo de estresse, seja biótico ou abiótico (FARIA, 2000; DATNOFF et al., 2001). É reconhecida a influência do elemento na resistência das plantas ao ataque de insetos e à incidência de doenças, na melhoria do estado nutricional, na redução da transpiração e em alguns aspectos da eficiência fotossintética (PEREIRA JÚNIOR, 2008).

Para a o cultivo de arroz de terras altas, a adição de produtos que contenham Si, como os subprodutos industriais, resulta em benefícios à cultura (PRADO; KORNDORFER, 2003). Isto é atribuído, além dos efeitos benéficos do Si já citados, ao fato do elemento melhorar o poder oxidante das raízes, diminuindo a absorção excessiva de ferro (MALAVOLTA; FORNASIERI FILHO, 1983) e por aumentar o aproveitamento de P pelas plantas, principalmente em solos muito intemperizados (VOLKWEISS; RAIJ, 1976)

Objetivou-se, com este estudo, avaliar a eficiência de subprodutos industriais, um agregado siderúrgico e um subproduto da indústria fosfatada, como fontes de Si para a cultura do arroz irrigado por inundação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), campus Umuarama, Uberlândia - MG. Utilizou-se delineamento em blocos casualizados (DBC) com quatro repetições e esquema fatorial 3 x 3+1. Três diferentes fontes de Si foram testadas no cultivo de arroz irrigado por inundação, sendo a Wollastonita (WO - padrão de Si), um subproduto da siderurgia (EAA) e um subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados (AgroSiCa - AG), cujas características químicas estão descritas na Tabela 1.

TABELA 1. Características químicas das fontes de Si utilizadas neste experimento

Fonte	Si		Ca
	Total	Disponível	HCl
		%	
AG	12	5,4	22
WO	24	12	31
EAA	26,3	0,4	2,9

Si total e disponível: Korndorfer et al. (2004); Ca e Mg: Embrapa (1997).

Os subprodutos foram aplicados a fim de se obter doses iguais a 0 (adicional controle) 200, 400 e 600 kg ha⁻¹ de Si e a quantidade aplicada foi definida de acordo com os teores de Si total contido nos mesmos (Tabela 2). Além dos subprodutos, também foram adicionadas doses de CaCO₃ (10,9 g vaso⁻¹) e de MgCO₃ (2,2 g vaso⁻¹) visando à correção da acidez do solo e a disponibilização de Ca e Mg.

TABELA 2. Tratamentos, doses de Si e das fontes utilizadas no presente estudo

Fonte	Dose de Si	Si total	Dose da fonte	Dose da fonte
	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	g vaso ⁻¹
Testemunha	0	-	0	0,0
AgroSiCa	200	12	1667	13,3
AgroSiCa	400	12	3314	26,7
AgroSiCa	600	12	4971	40,0
Wollastonita	200	24	833	4,2
Wollastonita	400	24	1667	8,3
Wollastonita	600	24	2500	12,5
EAA	200	26,2	1053	5,3
EAA	400	26,2	2105	10,5
EAA	600	26,2	3158	15,8

Si total: Korndorfer et al. (2004).

Os tratamentos foram incubados por 60 dias em 2 diferentes tipos de solo, sendo um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd) (69% de argila) e um NEOSSOLO QUARTZARENICO Órtico típico (RQo) (9% de argila) (EMBRAPA, 2009), coletados na profundidade de 0-20 cm, utilizando-se 10 kg de solo, cujas características estão apresentadas nas tabelas 3 e 4. As amostras foram mantidas com umidade em torno de 80% do valor de capacidade de campo de cada solo.

TABELA 3. Características físicas dos solos utilizados neste experimento

Solo	Areia	Silte	Argila
	dag kg ⁻¹		
LVd	21	10	69
RQo	90	1	9

Análise textural pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

TABELA 4. Características químicas dos solos utilizados neste experimento

Solo	pH	Si	K ⁺	P	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	T	t	V	m
	CaCl ₂	---mg dm ⁻³ ---			-----cmol _c dm ⁻³ -----				-----%----			
LVd	3,8	5,6	18,6	0,2	0,8	0,6	0,1	0,75	3,3	1,55	22,7	51,6
RQo	3,6	2,6	8,1	3,1	0,9	0,6	0,1	0,7	3,5	1,6	20	56,2

Si: CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; P, K: (Mehlich-1); Al, Ca, Mg: (KCl 1 mol L⁻¹); SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; t: CTC efetiva; V: saturação por bases; m: saturação por Al.

Após o período de incubação, adicionaram-se às amostras 40 mg kg⁻¹ de N e 180 mg kg⁻¹ de P₂O₅ através da fonte fosfato monoamônico (MAP) e 180 mg kg⁻¹ de K₂O via cloreto de potássio (KCl). Os micronutrientes foram fornecidos aplicando-se 3,6; 0,72; 0,34 e 0,8 mg kg⁻¹ de Zn, B, Cu e Mn, respectivamente, através da fonte FTE BR-12.

Em seguida, o cultivar de arroz de ciclo irrigado BRS Atalanta foi semeado, o qual apresenta plantas do tipo “moderno-filipino”, de folhas e grãos lisos, alta capacidade de perfilhamento e colmos fortes (EMBRAPA, 2007). Foram plantadas 10 sementes por vaso, em uma profundidade de 2 cm, sendo que, após a emergência das plântulas, realizou-se o desbaste, mantendo-se 4 plantas por vaso. Neste momento, também foi acrescentada uma lâmina de água de aproximadamente 2 cm, a qual foi mantida até o momento da colheita.

Aos 20 e 45 dias após a semeadura (DAS), aplicou-se sulfato de amônio em cobertura visando disponibilizar 100 mg kg⁻¹ de N. Além disso, uma solução nutritiva de micronutrientes contendo 2,86 g de H₃BO₃ (17% de B), 1,67 g de MnSO₄.H₂O (30% de Mn), 0,40 g de ZnSO₄.7H₂O (21% de Zn), 0,10 g de CuSO₄.5H₂O (24% de Cu) e 0,04g de NH₄MoO₄.2H₂O (40% de Mo) foi aplicada semanalmente. Ressalta-se ainda que observações periódicas foram realizadas para avaliar a possível incidência de pragas e doenças no cultivo do arroz.

As plantas de arroz foram colhidas aos 89 DAS com o auxílio de tesouras de podas, bem como amostras de solo foram coletadas utilizando-se um mini-trado. As amostras vegetais foram lavadas, secas em estufas e pesadas para a obtenção da matéria seca da parte aérea (MSPA). Em seguida, as amostras foram moídas e submetidas à digestão nítrico-perclórica (JOHNSON; ULRICH, 1959), sendo posteriormente determinados os teores de P, por colorimetria (NOGUEIRA; SOUZA, 2005) e os de Ca, por espectrofotometria de absorção atômica (AOAC, 1975).

As amostras moídas também foram submetidas à análise de Si seguindo metodologia proposta por Korndorfer et al. (2004), com adaptações. O método consiste na digestão de 0,1 g do tecido vegetal com 4 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), 3 mL de hidróxido de sódio 1:1 (NaOH) e 3 gotas de álcool octílico ($C_8H_{18}O$). Posteriormente, o extrato permanece em banho maria por uma hora à temperatura de $90^\circ C$ e, logo depois, em autoclave por uma hora com temperatura de $121^\circ C$ e 1 atm. Adicionam-se 3 gotas de álcool octílico ($C_8H_{18}O$) e 4 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), seguida por nova permanência em banho maria ($90^\circ C$) e em autoclave ($121^\circ C$ e 1 atm) por uma hora.

Por fim, são adicionados 44 mL de água destilada e 1 mL de fluoreto de amônio ($NH_4F - 5 \text{ mmol L}^{-1}$). A determinação de Si é realizada retirando-se 2 mL do extrato e adicionando-se 18 mL de água destilada, 2 mL de ácido clorídrico (HCl - 20%); 1 mL de molibdato de amônio ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} - 0,26 \text{ mol L}^{-1}$), 2 mL de ácido tartárico ($C_4H_6O_6 - 200 \text{ g L}^{-1}$) e 2 mL de solução ANSA + bissulfito. Esta última solução é preparada dissolvendo-se 1 g de 1-amino, 2-naftol-4-ácido sulfônico e 2 g de sulfito de sódio em 100 mL de água destilada e, em seguida, misturando-a em uma solução de 60 g de bissulfito de sódio dissolvido em 200 mL de água destilada e completando o volume final para 500 mL.

Para a curva de calibração, são preparadas soluções com 0; 7,5; 15; 30; 45; 60 $mg \text{ dm}^{-3}$ de Si. A determinação de Si da curva de calibração é realizada utilizando as mesmas soluções e volumes das demais amostras, com exceção dos volumes de água e HCl, que neste caso utilizam-se 19 mL de água destilada e apenas 1 mL de HCl. Feito isso, aguardam-se 30 minutos para a quantificação de Si em espectrofotômetro à 670 nm.

Ressalta-se que os teores dos nutrientes na parte aérea foram convertidos a teores acumulados utilizando-se os valores de MSPA, obtendo-se assim valores em $mg \text{ vaso}^{-1}$. As amostras de solo foram secas, peneiradas e submetidas à análise de P, Ca (TEDESCO et al., 1995) e Si (KORNDORFER et al., 2004).

As médias dos tratamentos foram submetidas à análise de variância utilizando-se o programa ASSISTAT versão 7.6 beta (SILVA; AZEVEDO, 2016). Compararam-se as médias pelos Testes de Tukey (0,05 de significância) e Dunnet (0,05 de significância). Para a variável dose, realizou-se análise de regressão com auxílio do programa estatístico SISVAR versão 5.3 (FERREIRA, 2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo geral, a adubação silicatada resultou em maior acúmulo MSPA em plantas de arroz. Assim, nos tratamentos em que as fontes WO e AG foram utilizadas, em LVd, observaram-s maior MSPA quando comparados àqueles que não receberam doses de Si (Tabela 5). Neste solo, a aplicação da fonte AG, na dose de 352 kg ha⁻¹ de Si, promoveria maior acúmulo de MSPA em plantas de arroz (Figura 1a).

Para o solo de textura arenosa, além da WO e AG, o subproduto da siderurgia também resultou em incrementos na MSPA em relação à testemunha (Tabela 6), sendo que, neste solo, o aumento das doses de ambos os subprodutos (AG e EAA) promoveu acréscimos lineares na MSPA (Figura 1b).

TABELA 5. Matéria seca da parte aérea (MSPA, g vaso⁻¹) de plantas de arroz cultivadas em LVd em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha ⁻¹)	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		20,4	
200	25,7 B*	18,4 C	34,8 A*
400	28,6 B*	21,9 C	46,0 A*
600	31,5 A*	22,7 C	27,2 B*

DMS_{Tukey}: 2,5; DMS_{Dunnet}: 2,9; CV (%): 5,2.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

TABELA 6. Matéria seca da parte aérea (MSPA, g vaso⁻¹) de plantas de arroz cultivadas em RQo em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha ⁻¹)	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		20,3	
200	29,6 A*	19,6 C	24,7 B*
400	26,7 A*	23,7 B*	24,7 A*
600	27,6 A*	24,2 B*	30,4 A*

DMS_{Tukey}: 2,9; DMS_{Dunnet}: 3,3; CV (%): 6,5.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

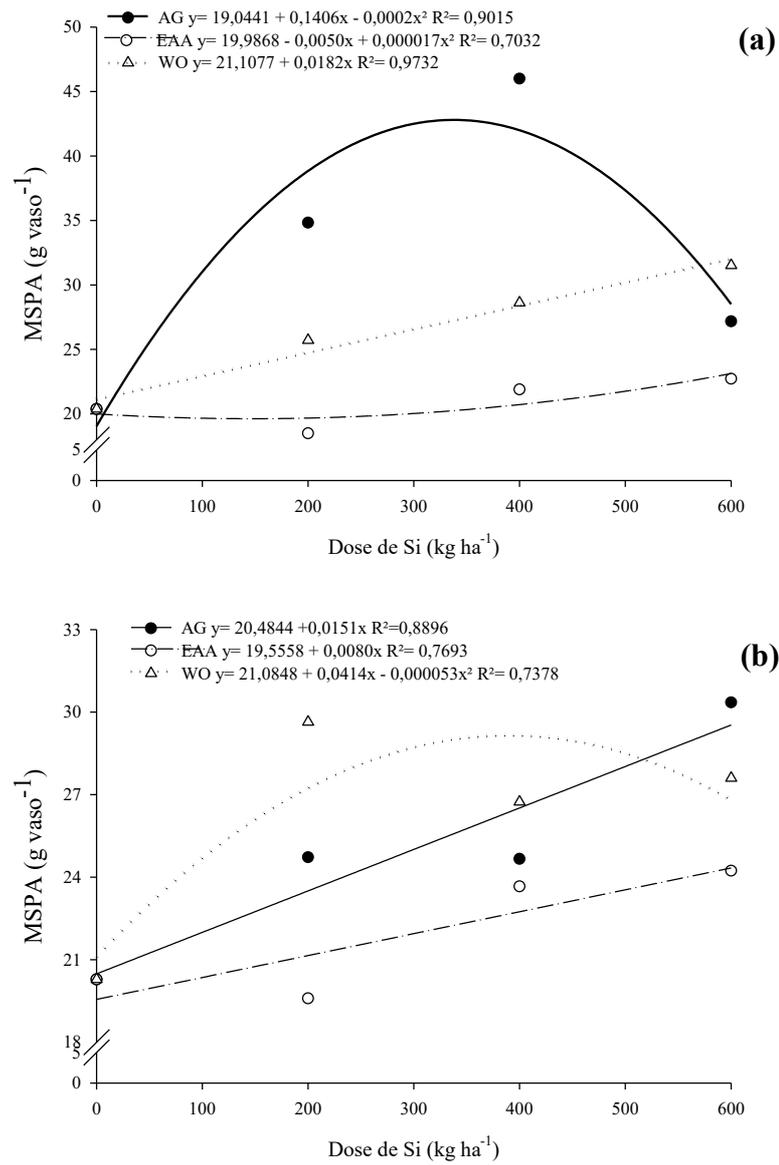


FIGURA 1. Efeito de doses crescentes de Si na MSPA de plantas de arroz cultivadas em LVd (a) e RQo (b)

Esses resultados confirmam a eficiência da adubação silicatada em incrementar a MSPA de plantas de arroz. Os maiores valores de MSPA observados com a aplicação de Si estão relacionados, muitas vezes, aos efeitos indiretos do elemento no desenvolvimento das plantas. Deren et al. (1994) afirmam que a adubação com Si promove melhorias na arquitetura da planta, aumentando a taxa fotossintética, e permitindo a maior captação da energia luminosa (YOSHIDA et al., 1969, citado por CARVALHO-PUPPATO, 2004). Além disso, o Si aumenta a resistência das plantas às doenças (MITANI; MA, 2005), melhora o aproveitamento da água (AGARIE et al., 1998; BEZERRA, 2015) e promove aumentos em produtividade das culturas, principalmente em espécies acumuladoras deste elemento, a exemplo das culturas do arroz e da cana-de-açúcar (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995; SINGH et al., 2005).

Maiores teores de Si disponível, em ambos os solos, foram obtidos nos tratamentos em que a fonte padrão WO foi utilizada (Tabelas 7 e 8). Entretanto, observa-se que a aplicação dos subprodutos também resultou em teores de Si disponível nos solos superiores ao tratamento controle, especialmente na maior dose aplicada, demonstrando a eficiência dessas fontes em aumentar os teores deste elemento em solos tropicais.

TABELA 7. Teores de Si disponível (mg dm^{-3}) em LVd em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha^{-1})	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		1,9	
200	4,1 A*	4,5 A*	2,7 B
400	6,6 A*	6,9 A*	2,6 B
600	11,6 A*	5,1 B*	4,8 B*

DMS_{Tukey}: 0,8 DMS_{Dunnet}: 1,0; CV (%): 9,5.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

TABELA 8. Teores de Si disponível (mg dm^{-3}) em RQo em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha^{-1})	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		1,0	
200	2,5 A*	1,3 B	1,5 B*
400	2,1 A*	1,6 B*	2,4 A*
600	3,6* A*	2,5 B*	2,2 B*

DMS_{Tukey}: 0,3; DMS_{Dunnet}: 0,4; CV (%): 9,3.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Os baixos teores de Si observados nos tratamentos que não receberam adubação silicatada são consequência da mineralogia do solo resultante do avançado grau de intemperismo desses solos, bem como da possível presença de óxidos de Fe e Al, os quais são os principais responsáveis pela adsorção do Si (TOKURA et al., 2007). Neste sentido, torna-se interessante a utilização de subprodutos como fontes de Si nestes solos, uma vez que o potencial de resposta das plantas à aplicação do elemento aumenta em solos que apresentam baixa disponibilidade desse elemento.

Elevados teores de Si disponível no solo com a aplicação do subproduto da indústria fosfatada também foram encontrados por Valle et al. (2016), os quais afirmam que os aumentos demonstram a alta solubilidade e eficiência da utilização do subproduto como fonte de Si. Quanto aos agregados siderúrgicos, a exemplo da fonte EAA, Gomes et al. (2011), avaliando o efeito da aplicação de subprodutos da siderurgia como fontes silicatadas, também obtiveram aumentos significativos nos teores de Si disponível em solos de textura argilosa e arenosa.

Observa-se na figura 2 que, para o solo de textura argilosa, o aumento das doses das fontes WO e AG resultou em acréscimos lineares nos teores de Si disponível no solo. Dessa forma, a cada 100 kg ha⁻¹ de Si aplicado, obtêm-se aumentos de 2 e 0,4 kg ha⁻¹ de Si disponível no solo com a aplicação das fontes WO e AG, respectivamente. Já para o solo RQo, aumentos lineares nos teores de Si disponível foram observados com a aplicação de todas as fontes, ressaltando que para o AG os incrementos no solo LVD foram duas vezes superiores ao solo RQo, ou seja, a cada 100 kg ha⁻¹ de Si observou-se aumento de 0,2 kg ha⁻¹ de Si disponível (Figura 2).

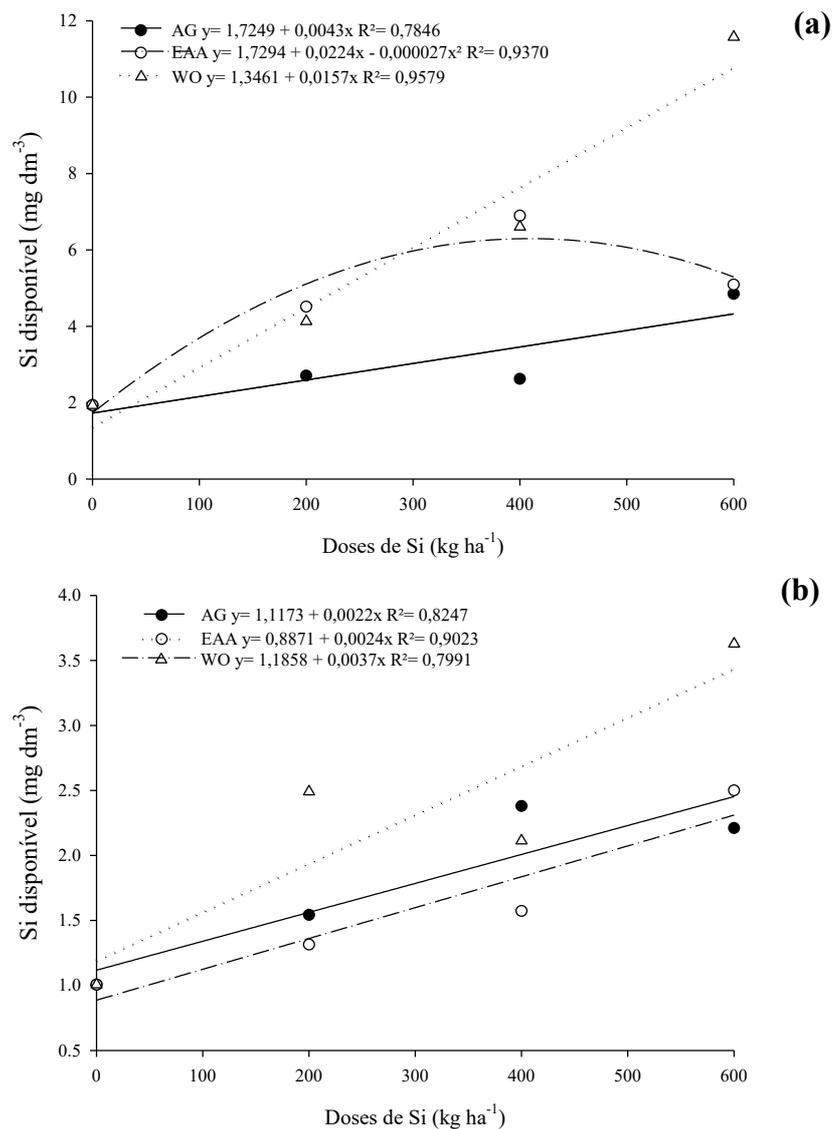


FIGURA 2. Efeito de doses crescentes de Si nos teores de Si disponível em LVd (a) e RQo (b)

Os valores de Si acumulado na parte aérea de plantas de arroz cultivadas com o subproduto da indústria fosfatada foram superiores àqueles obtidos com o uso do subproduto da siderurgia (Tabelas 9 e 10). Além disso, quando aplicado em LVd, nas doses de 200 e 400 kg ha⁻¹ de Si, o subproduto AG também foi superior ao tratamento padrão WO (Tabela 9). Este resultado demonstra que, muitas vezes, altos teores do elemento no solo, como observados com o uso da fonte WO, não correspondem à maior disponibilização do elemento pela fonte, pois também é necessário avaliar o que já foi absorvido pela planta.

TABELA 9. Si acumulado (mg vaso⁻¹) em plantas de arroz cultivadas em LVd em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha ⁻¹)	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		7,9	
200	36,9 B*	11,4 C	50,9 A*
400	40,0 B*	11,8 C	62,7 A*
600	59,9 A*	25,4 C*	50,6 B*

DMS_{Tukey}: 4,0; DMS_{Dunnet}: 4,7; CV (%): 6,5.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

TABELA 10. Si acumulado (mg vaso⁻¹) em plantas de arroz cultivadas em RQo em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha ⁻¹)	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		11,5	
200	45,9 A*	24,3 B*	28,7 B*
400	45,2 A*	37,1 B*	44,8 A*
600	75,7 A*	50,0 C*	54,8 B*

DMS_{Tukey}: 4,7; DMS_{Dunnet}: 5,5; CV (%): 6,5.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Para o solo RQo, o aumento das doses de todas as fontes promoveu acréscimos lineares nos teores de Si acumulado na parte aérea das plantas de arroz (Figura 3b). Por outro lado, para o solo LVd, observou-se ajuste polinomial quadrático com o aumento das doses da fonte AG, sendo que a aplicação do subproduto na dose de 460 kg ha⁻¹ de Si (ponto máximo da curva) promoveria maiores teores do elemento na parte aérea das plantas (Figura 3a).

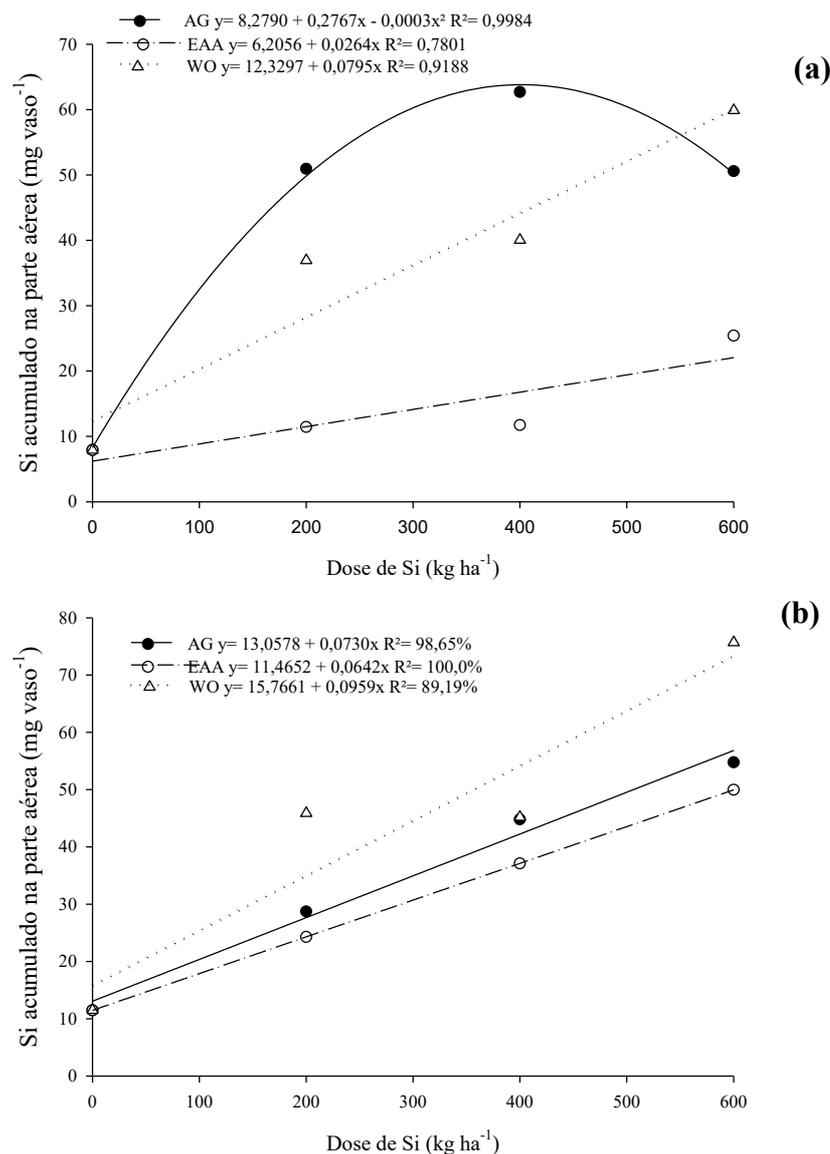


FIGURA 3. Efeito de doses crescentes de Si no Si acumulado na parte aérea de plantas de arroz em LVd (a) e RQo (b)

Em síntese, os subprodutos apresentaram potencial de uso agrícola como fonte de Si para a cultura do arroz para ambos os solos. Entretanto, a aplicação da fonte AG resultou em maior acúmulo do elemento na parte aérea das plantas de arroz. Yu et al. (2000) também obtiveram resultados semelhantes, concluindo que o ácido fluorsilícico gerado na indústria de fertilizantes fosfatados é considerado uma boa fonte de Si.

Quanto aos teores de Ca trocável nos solos, observa-se que, em geral, o subproduto resultante da acidulação de rochas fosfáticas para a indústria de fertilizantes promoveu maiores teores deste elemento nos solos (Tabelas 11 e 12) e acumulado na parte aérea de plantas de arroz (Tabelas 13 e 14).

TABELA 11. Teores de Ca trocável ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em LVd em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha^{-1})	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		3,5	
200	3,9 B	4,3 A*	3,7 B
400	3,9 C	4,6 B*	5,3 A*
600	3,8 B	4,3 B*	5,4 A*

DMS_{Tukey}:0,4; DMS_{Dunnet}: 0,4; CV (%): 5,1.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

TABELA 12. Teores de Ca trocável ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em RQo em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha^{-1})	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		3,0	
200	3,8 B*	3,7 B*	4,2 A*
400	3,2 C	3,7 B*	5,1 A*
600	3,3 B	4,4 A*	4,5* A*

DMS_{Tukey}:0,4; DMS_{Dunnet}: 0,5; CV (%): 5,7.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

TABELA 13. Ca acumulado (mg vaso^{-1}) em plantas de arroz cultivadas em LVd em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha^{-1})	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		70,0	
200	145,1 B*	83,9 C*	173,4 A*
400	138,4 B*	85,9 C*	238,9 A*
600	235,6 A*	202,7 B*	232,8 A*

DMS_{Tukey}: 8,8; DMS_{Dunnet}: 10,2; CV (%): 6,0.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

TABELA 14. Ca acumulado (mg vaso^{-1}) em plantas de arroz cultivadas em RQo em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha^{-1})	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		56,2	
200	125,8 A*	58,0 C	103,4 B*
400	94,4 B*	83,1 C*	110,5 A*
600	107,9 C*	117,4 B*	173,5 A*

DMS_{Tukey}:9,1; DMS_{Dunnet}: 12,5; CV (%): 5,1.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Verifica-se ainda que a cada 414 mg dm^{-3} de AG aplicados em LVd, $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca é disponibilizado para as culturas (Figura 4). Valle et al. (2016) observaram

resultados semelhantes, atribuíram este aumento à composição química do produto, o qual possui 22% de Ca.

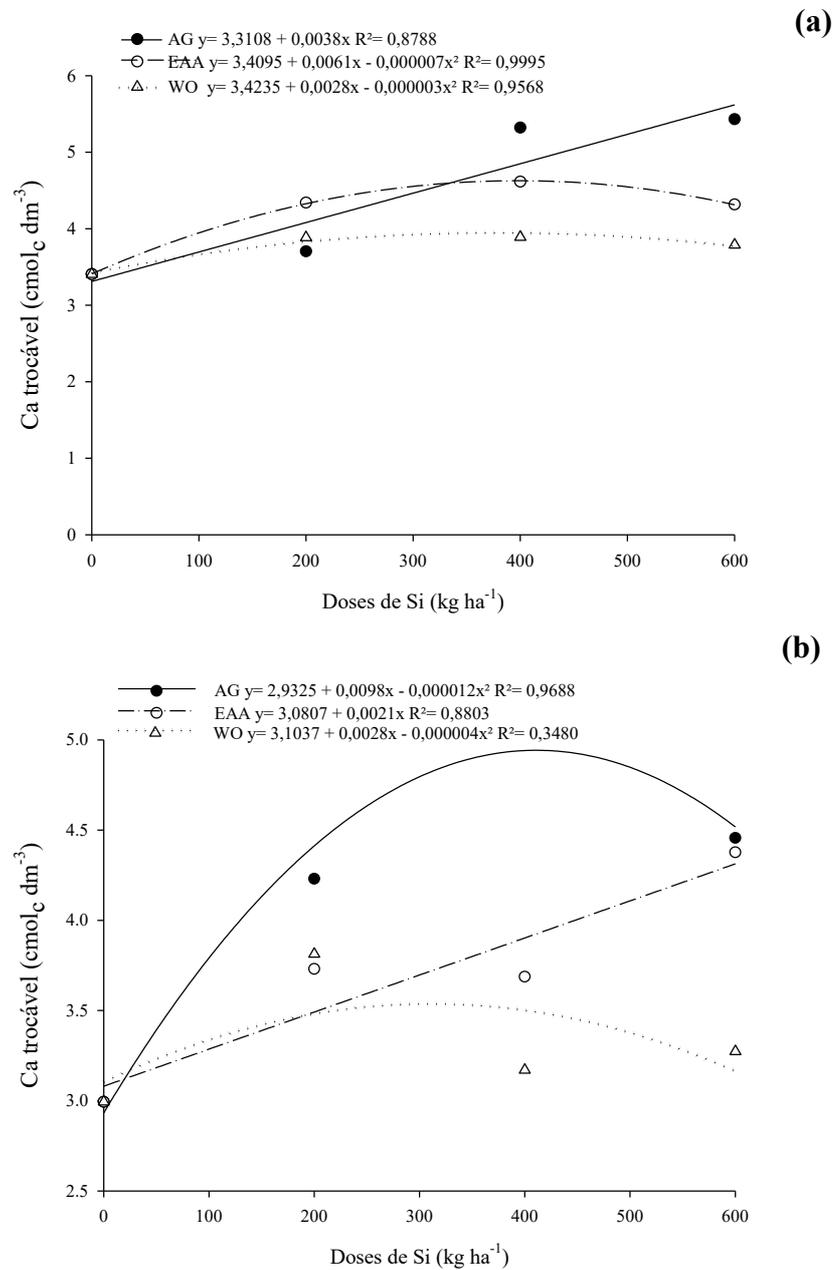


FIGURA 4. Efeito de doses crescentes de Si nos teores de Ca trocável em LVd (a) e RQo (b)

Ressalta-se que, apesar da fonte padrão WO apresentar maiores teores de Ca (31%) em sua composição, a fonte AG promoveu maiores teores de Ca trocável nos solos e acumulado na parte aérea de plantas de arroz. Isto ocorreu devido ao fato das doses das fontes serem estabelecidas de acordo com os teores de Si total das mesmas,

tornando-se necessária a aplicação de maiores doses do subproduto em relação à fonte padrão, proporcionando, conseqüentemente, maiores teores de Ca.

Apesar de ter apresentando menor eficiência em disponibilizar Ca às plantas quando comparado ao AG, o aumento das doses do subproduto da indústria siderúrgica promoveu acréscimos lineares dos teores do nutriente acumulado na parte aérea de plantas de arroz (Figura 5). Este aumento é resultado da composição química do material empregado, pois, no processo de fundição do aço, ocorre a reação do agregado com calcário e silicato (FIRME, 1986; VIDAL, 2008), ou seja, à medida que as doses do subproduto aumentam, os teores de Ca também aumentam.

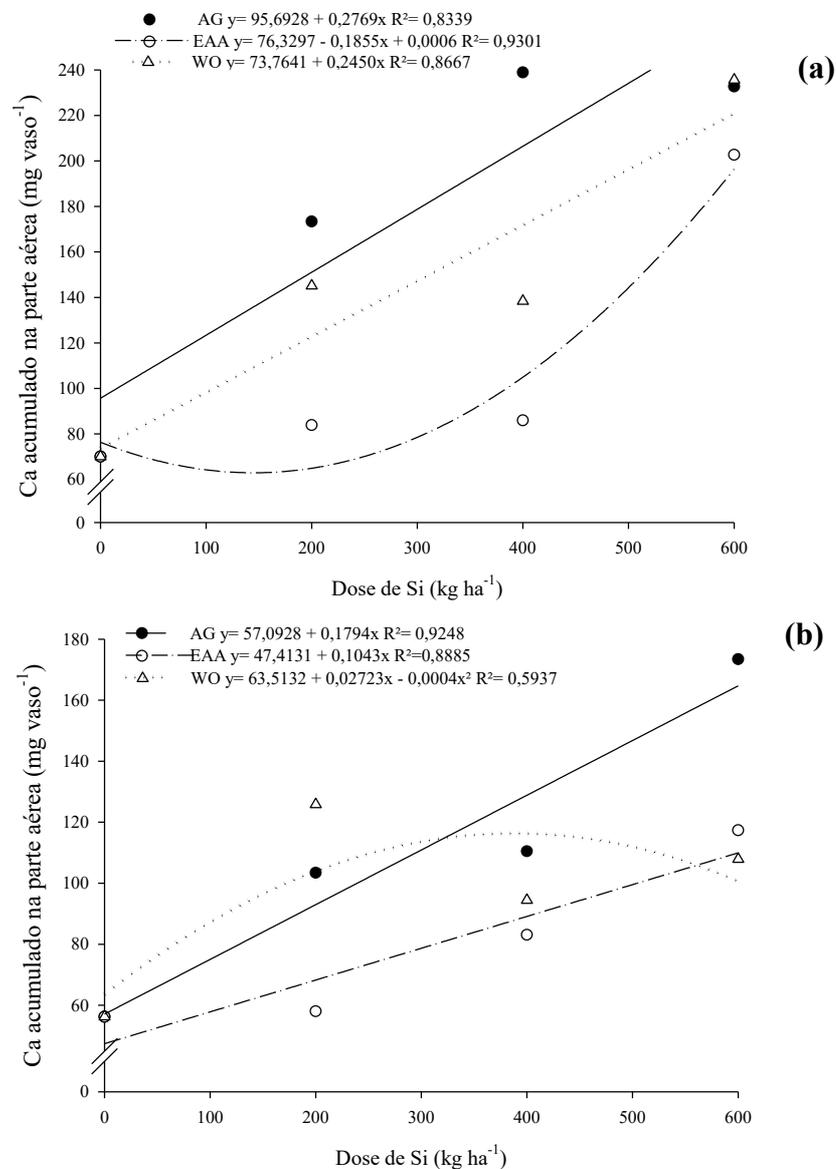


Figura 5. Efeito de doses crescentes de Si no Ca acumulado na parte aérea de plantas de arroz em LVd (a) e RQo (b)

Também foram analisados os teores de P disponível nos solos e acumulado na parte aérea de plantas de arroz, uma vez que estudos têm demonstrado que a presença de Si pode aumentar o aproveitamento de P pelas plantas, principalmente em solos muito intemperizados (WOLKWEISS; RAIJ, 1976; SANCHEZ; UEHARA, 1980; MENNA et al., 2014).

Neste sentido, para o solo de textura argilosa, a aplicação das fontes WO e AG promoveu maiores teores de P disponível no solo quando comparados à testemunha, independentemente da dose utilizada (Tabela 15). Nos tratamentos onde o subproduto da siderurgia foi aplicado, observaram-se acréscimos nos teores do elemento somente para a maior dose da fonte foi utilizada (600 kg ha⁻¹ de Si).

TABELA 15. Teores de P disponível (mg dm⁻³) em LVd em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha ⁻¹)	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		31,5	
200	43,7 A*	26,7 B*	41,9 A*
400	41,7 A*	27,4 B*	41,6 A*
600	34,9 B*	35,3 B*	46,9 A*

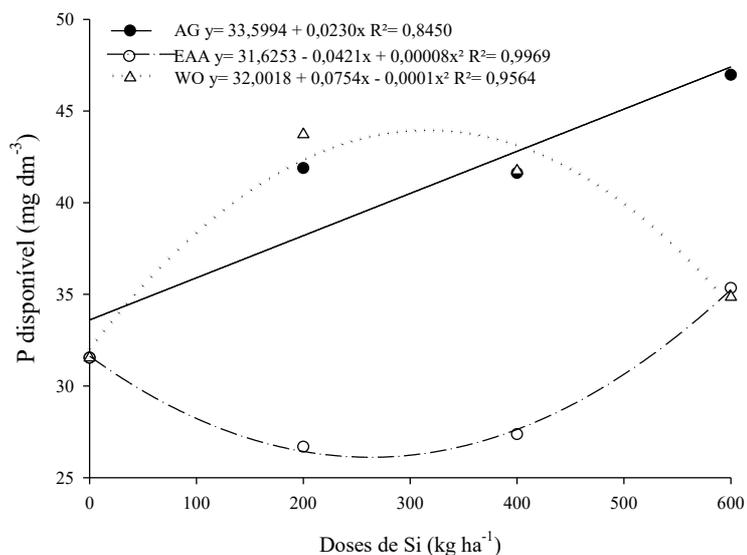
DMS_{Tukey}: 2,7; DMS_{Dunnet}: 3,2; CV (%): 4,2.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Sabe-se que a presença de Si pode resultar, muitas vezes, em menor fixação de P em solos tropicais, uma vez que os elementos competem pelos mesmos sítios de adsorção nos solos (POZZA et al., 2007). Dessa forma, o aumento da concentração de Si no solo através da adubação silicatada resulta em menor adsorção de P aos colóides do solo e maior disponibilidade do elemento para as plantas.

Ressalta-se ainda que a aplicação da maior dose do subproduto da indústria fosfatada, em LVd, resultou em maiores teores de P disponível no solo quando comparada aos demais tratamentos. Isto acontece uma vez que, além de Si, a fonte AG possui F em sua composição. A presença de F nos solos resulta na formação de pares iônicos Al-F e Al-OH, complexando o Al ligado ao P e aumentando a disponibilidade do macronutriente na solução (AMARAL, 1997). Assim, o aumento da dose de AG, em LVd, promoveu acréscimos lineares nos teores de P disponível no solo (Figura 6).

(a)



(b)

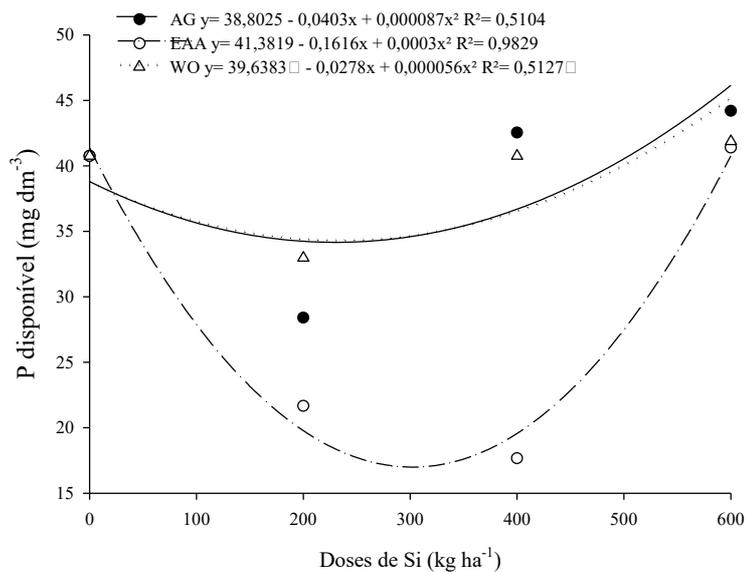


FIGURA 6. Efeito de doses crescentes de Si nos teores de P disponível em LVd (a) e RQo (b).

Por outro lado, não foram observados maiores teores de P com adubação silicatada no solo de textura arenosa (Tabela 16). Novais e Smith (1999) afirmam que os solos tropicais, a exemplo dos Latossolos, são altamente intemperizados, com predominância de minerais de argila 1:1, como a caulinita e os sesquióxidos de Fe (Fe_2O_3 e $FeOOH$) e Al ($Al(OH)_3$), apresentando maior capacidade de adsorção de P.

Desta forma, maior influência da adubação silicatada na disponibilidade de P são observadas nesses solos (FARIA et al., 2000).

TABELA 16. Teores de P disponível (mg dm^{-3}) em RQo em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha^{-1})	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		40,7	
200	32,9 A*	21,7 C*	28,4 B*
400	40,8 A	17,7 B*	42,5 A
600	41,9 A	41,4 A	44,2 A

DMS_{Tukey}: 4,0; DMS_{Dunnet}: 4,6; CV (%): 6,5.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Resultados semelhantes foram obtidos ao se analisar o P acumulado na parte aérea, uma vez que, de modo geral, maiores teores do elemento foram observados em plantas de arroz cultivadas sob a aplicação do subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados (Tabelas 17 e 18).

TABELA 17. P acumulado (mg vaso^{-1}) em plantas de arroz cultivadas em LVD em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha^{-1})	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		27,3	
200	46,2 B*	36,4 C*	59,3 A*
400	63,7 B*	45,0 C*	114,3 A*
600	49,6 B*	41,8 C*	100,2 A*

DMS_{Tukey}: 4,5; DMS_{Dunnet}: 5,3; CV (%): 4,7.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

TABELA 18. P acumulado (mg vaso^{-1}) em plantas de arroz cultivadas em RQo em função da aplicação de doses crescentes de Si

Doses de Si (kg ha^{-1})	Fonte		
	WO	EAA	AG
0		50,2	
200	66,0 A*	46,2 C	59,5 B*
400	56,5 A*	53,4 B	59,6 A*
600	67,6 B*	58,1 C*	72,4 A*

DMS_{Tukey}: 4,0; DMS_{Dunnet}: 4,6; CV (%): 3,9.

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Médias diferem da testemunha (*) pelo teste de Dunnet a 0,05 de significância.

Dessa forma, a aplicação de doses crescentes desta fonte resultou em acréscimos lineares nos teores de P acumulado na parte aérea de plantas de arroz cultivadas em RQo, com acréscimos de 18 mg dm^{-3} de P para cada 414 mg dm^{-3} da fonte aplicada

(Figura 7b). Já para as plantas cultivadas em LVd, observa-se que a aplicação da fonte na dose de 377 kg ha⁻¹ de Si promoveria os maiores teores de P acumulado nas plantas (Figura 7a).

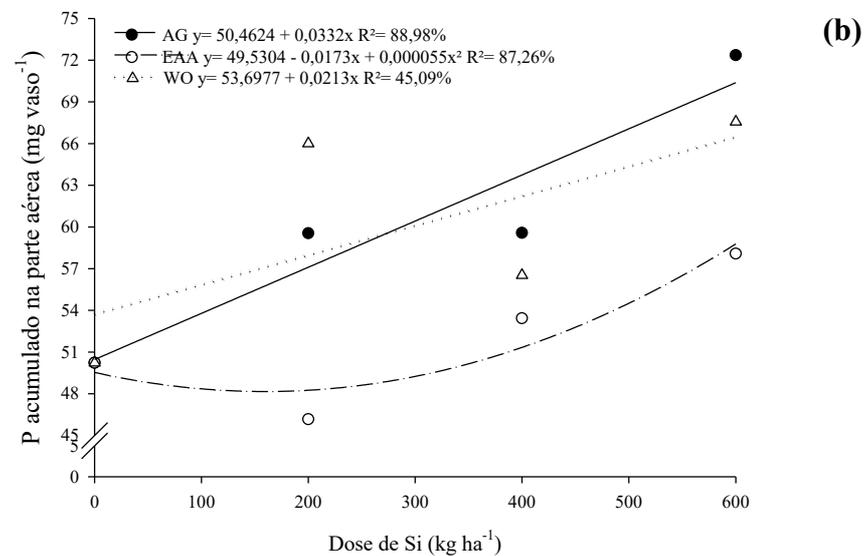
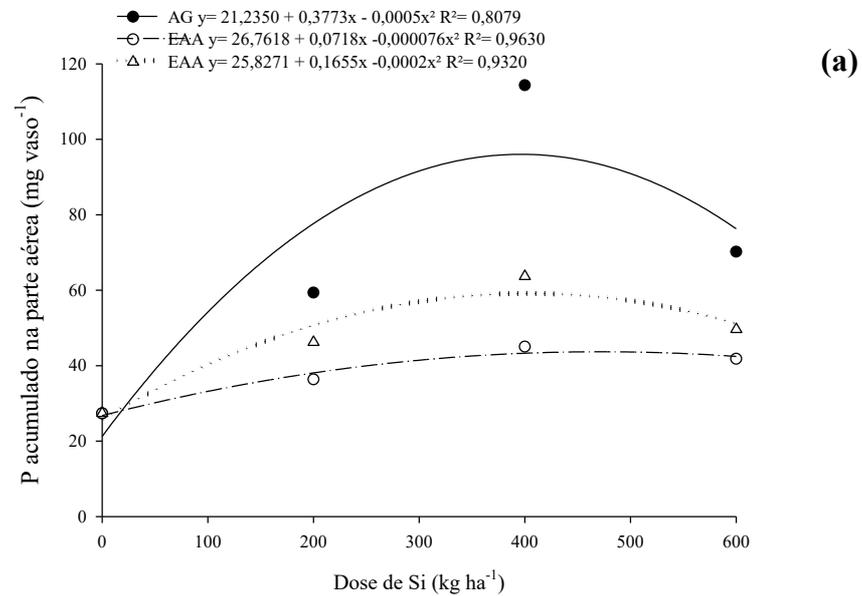


FIGURA 7. Efeito de doses crescentes de Si no P acumulado na parte aérea de plantas de arroz em LVd (a) e RQo (b).

4. CONCLUSÕES

A eficiência da adubação silicatada em promover acréscimos na MSPA foi observada com a aplicação das fontes, demonstrando o grande potencial de uso agrícola de subprodutos das indústrias siderúrgicas e fosfatadas no cultivo de arroz irrigado por inundação.

A utilização dos subprodutos industriais resultou em acréscimos nos teores de Si disponível nos solos, especialmente ao serem aplicados na dose de 600 kg ha^{-1} de Si. Ademais, ao se avaliar os teores de Si acumulado na parte aérea de plantas de arroz, observa-se que o subproduto da indústria fosfatada (AG) promoveu maiores acréscimos.

Os teores de Ca trocável nos solos e acumulado em plantas de arroz também aumentaram com a aplicação dos subprodutos. Em geral, a fonte AG apresentou maior eficiência em disponibilizar o macronutriente às plantas. Entretanto, também foram observados acréscimos nos teores do elemento acumulado na parte aérea de plantas de arroz com a aplicação do subproduto da indústria siderúrgica (EAA).

Os subprodutos também promoveram acréscimos nos teores de P disponível nos solos e acumulado na parte aérea de plantas de arroz, sendo os valores mais expressivos com a aplicação da fonte AG.

REFERÊNCIAS

AGARIE, S.; HANAOKA, N.; UENO, O. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). **Plant Production Science**, Tokyo, v. 1, n. 2, p.89-95, 1998. <https://doi.org/10.1626/pps.1.89>

AMARAL, F. C. S. **Efeito do fluor sobre o aluminio e o fosforo em um podzolico vermelho-amarelo e sua acumulacao em algumas especies vegetais**. 1997, 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 1997.

ARAÚJO, J. C. T.; NASCIMENTO, C. A. W. A. Redistribuição entre frações e teores disponíveis de zinco em solos incubados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 635-644, 2005.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALITICAL CHEMISTS - AOAC. **Official methods of analysis**. 12. ed. Washington, D.C.: Association of Analytical Chemistry, 1975. 1094 p.

BEZERRA, B. K. L. **Adubação com silício e tolerância ao déficit hídrico em cana-de-açúcar**. 2015. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP– Campus de Botucatu, Botucatu, 2015.

CARVALHO-PUPATTO, J. C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade de arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1213-1218, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001200008>

CORREA, J. C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARCELINO, R.; MAUAD, M. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1307-1317, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000900013>

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H., KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in Agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 f.

DEREN, C. W.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; MARTIN, F. G. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 3, p. 733-737, 1994. <https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400030024x>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997, 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **BRS Atalanta: Alternativa para o uso racional da água nas lavouras de arroz irrigado do RS**. Circular Técnica, Pelotas, 2007.

FARIA, R. **Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz do sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 125 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 38, p. 109-112, 2014.

FIRME, D. J. **Enriquecimento e fusão de escória de siderurgia como fosfato natural**. 1986. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.

GOMES, C. F.; MARCHETTI, M. E.; NOVELINO, J. O.; MAUAD, M., ALOVISI, A. M. T. Disponibilidade de silício para a cultura do arroz, em função de fontes, tempo de incubação e classes de solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 4, p. 531-538, 2011. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i4.10906>

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Produção Siderúrgica Brasileira - Estatística Preliminar**, 2017, n°033. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/Preliminar_xyzfinal_17.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2017.

JOHNSON, C. M.; ULRICH, A. **Analytical methods for use in plants analyses** (Bulletin, 766). Los Angeles: University of California, p. 32-33, 1959.

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 70, p. 1-3, 1995.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. UFU-GPSi-ICIAG, Uberlândia, 2004. Disponível em: <http://www.nutricaoodeplantas.agr.br/site/downloads/bt2_gps_i.pdf>. Acesso: 29 dez. 2017.

MALAVOLTA, E.; FORNASIERI FILHO, D. Nutrição mineral da cultura do arroz. In: FERREIRA, M. E.; YAMADA, T.; MALAVOLTA, E. **Cultura do arroz de sequeiro: fatores afetando a produtividade**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, p. 95-140, 1983.

MARCIANO, C. R.; MORAES, S. O.; OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. Efeito de lixo urbano sobre a condutividade hidráulica de um latossolo amarelo saturado e não saturado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 1-9, 2001.

MEENA, V. D.; DOTANIYA, M. L.; COUMAR, V.; RAJENDIRAN, S.; KUNDU, S.; RAO, A. S. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**, v. 84, n. 3, p. 505-518, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0270-y>

MITANI, N., MA, J.F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 56, p. 1255-1261, 2005. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri121>

NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. **Manual de laboratórios: Solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2015 313 p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999, 1399 p.

PEREIRA JÚNIOR, P. **Doses de silício na produtividade de soja [Glycine max (L.) Merrill] e suas características agrônômicas**. 2008. 28 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

PIRES, A. M. M.; MATTIAZZO, M. E. **Avaliação da viabilidade do uso de resíduos na agricultura**. EMBRAPA. Jaguariúna: Circular técnica, 2008.

POZZA, A. A. A.; CURTI, N.; COSTA, E. T. S.; GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J. G. S. M.; MOTTA, P. E. F.; R. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 11, p. 1627-1633, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001100015>

PRADO, R. M.; KORNDORFER, G. H. Efeitos da escória de siderurgia sobre a cultura do milho (*Zea mays L.*) cultivados em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. **Científica**, Jaboticabal, v. 31, p. 9-17, 2003.

SANCHEZ, P. A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, p. 471-514, 1980.

SINGH, A. K.; SINGH, R.; SINGH, K. Growth, yield and economics of rice (*Oryza sativa*) as influenced by level and time of silicon application. **Indian Journal of Agronomy**, New Delhi, v. 50, n. 3, p. 190-193, 2005.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**. v. 11, p. 3733-3740, 2016. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11522>

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

TOKURA, A. M.; NETO, A. E. F.; CURTI, N.; CARNEIRO, L. F.; ALOVISI, A. A. Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 1, p. 9-16, 2007. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v29i1.58>

VALLE, L. A. R. **Avaliação do potencial de uso agrícola da fluorita com óxido silício (AgroSiCa), derivado da fabricação de fertilizantes fosfatados**. 2016. 121 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2016.

VALLE, L. A. R.; RODRIGUES, S. L.; RAMOS, S. J.; PEREIRA, H. S.; AMARAL, D. C.; SIQUEIRA, J. O.; GUILHERME, L. R. G. Beneficial use of a by-product from the phosphate fertilizer industry in tropical soils: effects on soil properties and maize and soybean growth. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 112, p. 113-120, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.037>

VIDAL, A. de A. **Escória de siderurgia na cultura do arroz: Fonte de silício e a interação com o Nitrogênio**. São Paulo, 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2008.

VOLKWEISS, S. J.; RAIJ, B. V. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: SIMPÓSIO SOBRE CERRADO. Brasília. Bases para utilização agropecuária, Uberlândia, 1976. **Anais...** São Paulo: EDUSP, p. 317-332, 1976.

YOU, S. H.; RHEE, K.; LEE, C. K.; YANG, D. Two-Step ammoniation of by-product fluosilicic acid to produce high quality amorphous silica. **Korea Journal of Chemical Engineering**, v. 17, p. 401-408, 2000. <https://doi.org/10.1007/BF02706850>