



Universidade Federal
de São João del-Rei

ELOISO JUNIO CORRÊA CAMPOS

**AVALIAÇÃO DO USO DE SILÍCIO NA CORREÇÃO DE ACIDEZ
DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DO MILHO E DO
FEIJÃO**

SETE LAGOAS

2022

ELOISO JUNIO CORRÊA CAMPOS

**AVALIAÇÃO DO USO DE SILÍCIO NA CORREÇÃO DE ACIDEZ
DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DO MILHO E DO
FEIJÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, da Universidade Federal de São João del-Rei, *Campus Sete Lagoas*, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias, na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Amilton Ferreira da Silva

SETE LAGOAS

2022

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C198a Campos, Eloiso Junio Corrêa .
Avaliação do uso de silício na correção de acidez do solo e na produtividade das culturas do milho e do feijão / Eloiso Junio Corrêa Campos ; orientador Amilton Ferreira da Silva. -- Sete Lagoas, 2022.
48 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias) -- Universidade Federal de São João del-Rei, 2022.

1. Zea mays L. 2. Phaseolus vulgaris L. 3. Fertilidade do solo. 4. Escória de siderúrgica. 5. Produção de grãos. I. Silva, Amilton Ferreira da , orient. II. Título.

ELOISO JUNIO CORRÊA CAMPOS

**AVALIAÇÃO DO USO DE SILÍCIO NA CORREÇÃO DE ACIDEZ
DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DO MILHO E DO
FEIJÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal de São João del-Rei, campus Sete Lagoas, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias, na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Amilton Ferreira da Silva

Sete Lagoas, 29 de Julho de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rafael da Silva Teixeira - UFV

Prof^a. Dr^a. Aline de Almeida Vasconcelos - UFSJ

Amilton Ferreira da Silva
Orientador - UFSJ

SUMÁRIO

RESUMO.....	I
ABSTRACT	II
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 O Silício no solo.....	2
2.2 Escória de siderúrgica	3
2.3 Funções na planta.....	4
2.4 Defesas contra o ataque de pragas	6
2.5 Mecanismos de absorção	8
2.6 Cultura do milho	10
2.7 Cultura do feijão.....	11
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
3.1 Preparo da escória	13
3.2 Análise de PRNT (poder relativo de neutralização total)	14
3.3 Extração de Si solúvel na escória.....	15
3.4 Delineamento experimental	17
3.5 Preparo do solo, adubação e semeadura.....	17
3.7 Avaliações	18
3.8 Teor de Si no tecido	19
3.9 Análise de pH e do teor de Si solúvel no solo	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.1 Teor de Si solúvel no solo.....	22
4.2 Crescimento e Produtividade no milho.....	26
4.3 Produtividade do feijão	28

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
6 CONCLUSÕES	32
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

AVALIAÇÃO DO USO DE SILÍCIO NA CORREÇÃO DE ACIDEZ DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DO MILHO E DO FEIJÃO

RESUMO – A crescente demanda por produção de alimentos, aliado ao desenvolvimento biotecnológico, tornou o Brasil um dos maiores consumidores de fertilizantes do mundo, como consequência, o insumo do mercado interno não foi suficiente para suprir a demanda, fazendo com que o país se tornasse dependente de importação, aumentando o custo de produção. O Brasil se destaca não só na agricultura, mas também na produção de ferro gusa, sendo a cidade de Sete Lagoas – MG uma das mais importantes no setor siderúrgico. A escória é um subproduto da produção de ferro gusa que apresenta alto teor de silicatos que, em reação com prótons de hidrogênio disponíveis no solo, reage formando ácido monossilícico, forma absorvível pelas plantas. O silício (Si) é considerado um elemento benéfico e tem sido ignorado por muito muitos anos na agricultura. Pesquisas têm mostrado melhoria na qualidade nutricional da planta e os efeitos benéficos na correção da acidez do solo. O rejeito, produzido em grande quantidade, pode ser aproveitado na agricultura, principalmente para culturas consideradas acumuladoras de Si, como é o caso do milho. Já o feijão é considerado uma planta não acumuladora, todavia, diferentes fontes podem disponibilizar o Si em maiores ou menores quantidades. Assim, objetivou-se com esse trabalho, avaliar o efeito do uso de escória de siderúrgica como fonte de silicato na correção de acidez do solo e seu efeito nas variáveis de crescimento e produtividade nas culturas do milho e do feijão. Como o feijão é considerado uma planta não acumuladora, decidiu-se que ele fosse cultivado após o plantio do milho para que a escória tivesse um maior período de reação no solo (8 meses). Além disso, a planta poderia aproveitar os fitólitos liberados pela palhada da cultura anterior que ficou depositada na área. O trabalho foi realizado em blocos casualizados no campo experimental Universidade Federal de São João del-Rei – campus Sete Lagoas, localizado na região central de Minas Gerais, constando de 6 tratamentos (doses de escória) e 4 repetições. A escória foi moída, passada em peneira de 2mm e distribuída nas doses equivalentes a 0 (testemunha), 50, 100, 200, 400 e 800 kg ha⁻¹ de SiO₂. As variáveis analisadas foram aquelas relacionadas com a correção do pH e produtividade da planta. Nenhuma das variáveis analisadas apresentou resultado significativo, provavelmente devido à baixa solubilização da fonte de silicato utilizada. As doses de escória não corrigiram a acidez do solo, não influenciou a produtividade, também não aumentou o teor de Si na planta e nem no solo. A planta de milho apresentou potencial de absorção, translocação e polimerização de silício, diferentemente do feijão, que não foi possível observar nenhuma absorção. O pH do solo não sofreu alteração pela não reatividade da escória. A escória utilizada nas condições do experimento não apresentou solubilização eficiente.

Palavras-chave: *Zea mays* L.. *Phaseolus vulgaris* L.. Fertilidade do solo. Escória de siderúrgica. Produção de grãos.

EVALUATION OF THE USE OF SILICON IN CORRECTION OF SOIL ACIDITY AND IN THE PRODUCTIVITY OF CORN AND BEANS CROPS

ABSTRACT – The growing demand for food production, combined with biotechnological development, made Brazil one of the largest consumers of fertilizers in the world, as a consequence, the input from the domestic market was not enough to supply the demand, making the country dependent on imports, increasing the cost of production. Brazil stands out not only in agriculture, but also in the production of pig iron, with the city of Sete Lagoas - MG being one of the most important in the steel sector. Slag is a by-product of pig iron production that presents high content of silicates that, in reaction with hydrogen protons available in the soil, reacts forming monosilicic acid, a uptake form by plants. Silicon (Si) is considered a beneficial element and has been ignored for many years in agriculture. Research has shown improvement in plant nutritional quality and beneficial effects in correcting soil acidity. The tailings, produced in large quantities, can be used in agriculture, mainly for crops considered to accumulate Si, such as corn. On the other hand, beans are considered a non-accumulating plant, however, different sources can make Si available in greater or lesser amounts. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of using steel slag as a source of silicate in the correction of soil acidity and its effect on growth and productivity variables in corn and bean crops. As beans are considered a non-accumulating plant, it was decided to cultivate them after corn was planted so that the slag had a longer reaction period in the soil (8 months). In addition, the plant could take advantage of the phytoliths released by the straw from the previous crop that was deposited in the area. The work was carried out in randomized blocks in the experimental field Universidade Federal de São João del-Rei – Sete Lagoas campus, located in the central region of Minas Gerais, consisting of 6 treatments (slag doses) and 4 replications. The slag was ground, passed through a 2mm sieve and distributed in doses equivalent to 0 (control), 50, 100, 200, 400 and 800 kg ha⁻¹ of SiO₂. The variables analyzed were those related to pH correction and plant productivity. None of the analyzed variables presented a significant result, probably due to the low solubilization of the silicate source used. The slag doses did not correct the soil acidity, did not influence the productivity and did not increase the Si content in the plant or in the soil. The corn plant showed potential for absorption, translocation and silicon polymerization, unlike common bean, which was not possible to observe any absorption. Soil pH did not change due to slag non-reactivity. The slag used under the conditions of the experiment does not present efficient solubilization.

Keywords: *Zea mays* L.. *Phaseolus vulgaris* L.. Soil fertility. Steel slag. Grain production.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é hoje um dos mais importantes produtores agrícolas do mundo, e isso se deve à adoção de novas tecnologias, acompanhada de inúmeras pesquisas e grande esforço dos produtores rurais, o que mudou seu “status” de mero importador para grande exportador mundial de alimentos e matérias primas para os mais diversos setores agrícolas e industriais.

Dentre os inúmeros desafios que ainda existem no setor, a busca pela redução de dependência da importação de fertilizantes é uma das principais discussões colocadas em pauta hoje em dia, principalmente após a declaração de guerra da Rússia, fornecedor mais importante para o Brasil, contra a Ucrânia. Dessa forma, têm-se buscado alternativas internas para reduzir essa dependência (de Souza et al., 2015).

O uso do gesso agrícola é um exemplo clássico de como produtos antes considerados inúteis podem ser melhores explorados. A escória siderúrgica é um rejeito da produção de ferro gusa que pode apresentar características interessantes na correção da acidez do solo e no fornecimento de cálcio e silício para as plantas, principalmente. Todavia, pela grande quantidade de rejeito produzido pelas siderúrgicas, estima-se 3 milhões de toneladas ao ano, esse aproveitamento ainda é pouco difundido (Prado & Fernandes, 2000), sendo necessário um melhor conhecimento da eficiência da liberação de Si do produto bem como a absorção do elemento pela planta.

O silício tem sido ignorado por grande parte dos pesquisadores ao longo do tempo, talvez pela sua grande abundância na crosta terrestre. Porém, a maior parte do elemento está presente em sua forma não disponível para as plantas (Nanayakara et al., 2008). O elemento ainda é pouco explorado na agricultura e seu uso pode aumentar muito com novos estudos voltados para culturas comerciais (Sandim et al., 2010).

O silicato dissociado pela água no solo reage com íons de hidrogênio (H^+) formando ácido monossilícico, forma absorvível pelas plantas, essas reações liberam ânions de hidroxila oriundos da água que irá captar os íons H^+ disponível no solo, aumentando o pH do mesmo. Além disso, pode melhorar o balanço nutricional das plantas através de um sistema radicular mais rígido e mais volumoso que melhore a absorção de nutrientes, podendo acarretar em uma redução no uso de fertilizantes. O nutriente benéfico tem apresentado maior acúmulo (Zanão Júnior et al., 2009) e aumento de matéria seca radicular (Gunes et al., 2008), podendo ocorrer a formação de compostos aluminossilicatados na parede celular do córtex da raiz, inibindo a

absorção de alumínio para o protoplasma (Wang et al. 2004). Sabe-se que o alumínio é um dos grandes responsáveis pela inibição do crescimento radicular no solo (Giongo e Bohnen, 2011; Delhaize e Ryan, 1995). A interação do Si com o alumínio pode alterar a relação cálcio/alumínio reduzindo a toxidez.

Uma das culturas mais importantes do país é o milho, ficando atrás, apenas, da cultura da soja na balança comercial de grãos. A cultura se destaca pela sua importância na alimentação humana e animal (Sandim et al., 2010). O milho foi um dos grandes responsáveis pela expansão agropecuária no país, principalmente com a adoção de sistema de produção intensiva por grande parte dos produtores (de Souza et al., 2015). Apesar de ser uma cultura muito favorável ao clima tropical, ela é também muito exigente em fertilidade e isso obriga o produtor a ter conhecimento das características das cultivares que estão sendo adquiridas para que a planta responda em potencial produtivo. O milho é considerado planta acumuladora de silício (Ma e Takahashi, 2001). Porém, uma fonte eficiente na liberação de silicatos faz-se necessário para que a planta consiga absorver o nutriente.

Além do milho, o feijão também se destaca no país e seu cultivo em sucessão com o milho ajuda a incrementar os teores de N no solo devido a fixação biológica do nitrogênio (FBN) realizada pela associação feijão-microrganismos (Carneiro, 2005). Todavia, a intensificação dos cultivos, muitas vezes em áreas irrigadas, favorece o estabelecimento de pragas, levando o produtor a lançar mão de produtos fitossanitários com o intuito de reduzir danos, com conseqüente aumento dos custos de produção, maior dificuldade de controle das pragas e a redução de inimigos naturais e outros organismos benéficos.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de escória siderúrgica (fonte de silício) na correção do pH do solo e na produtividade das culturas do milho e do feijão, cultivados em sucessão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O silício no solo

O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, superado apenas pelo oxigênio (Zargar et al., 2019). Por causa dessa abundância, esse elemento não é considerado como fator limitante para as plantas o que, muitas vezes, causa uma depreciação de seu valor econômico na agricultura (Heckman, 2013). Apesar de sua grande quantidade, a

maior parte, 50 a 70 %, está ligada a minerais insolúveis (Heckman, 2013) na forma de óxidos (SiO_2) (Ma e Yamaji, 2015), forma não absorvível pelas plantas.

O Si é absorvido na sua forma solúvel de ácido monossilícico (H_4SiO_4) (Heckman, 2013). O grau de intemperismo do solo tem mostrado grande influência na regulação do suprimento de Si influenciando tanto pelo pH baixo quanto pelo alto teor de cátions trocáveis, reduzindo a disponibilidade do mesmo (Miles et al., 2014), características muito comuns dos solos de Cerrado. Assim, solos mais jovens geralmente contêm maiores teores de Si solúvel (Heckman, 2013). Porém, a disponibilidade potencial de absorção do Si ainda não é bem conhecida (Haynes and Zhou, 2018) e o conhecimento sobre o fluxo de Si em solos é escasso (Sommer et al., 2006). A correlação entre o Si no solo e absorção pelas plantas apresentam banco de dados ainda muito limitados (Heckman, 2013).

O tipo de solo também pode influenciar na dinâmica de absorção e interação com outros nutrientes. Carvalho et al. (2000) descrevem que é possível que o Si cause maior desorção de fósforo no Cambissolo (menos intemperizado e maior teor de Caulinita) do que em Latossolo Vermelho Escuro (maior teor de Gibsita), nas partículas do solo após a fertilização fosfatada.

2.2 Escória de siderúrgica

Sete Lagoas é uma cidade localizada na Mesorregião do Centro Leste Mineiro, e é considerada polo da região, atendendo às diversas demandas dos 38 municípios que a circundam. Sua área territorial é de 537,48 Km^2 , e está localizada a 68 km da capital, Belo Horizonte-MG. O município tem como principal fonte de renda a atividade siderúrgica, contando com 23 unidades (Governo de Minas Gerais, 2017).

Na produção de Ferro Gusa são gerados os gases de alto forno (GAF) e escória, subproduto do processo produtivo, que auxilia na retirada das impurezas geradas no processo, conserva o calor do metal e o protege do superaquecimento por possuir baixa condutibilidade térmica (Governo de Minas Gerais, 2017).

Estima-se que no Brasil são produzidas 3 milhões de toneladas de escória de siderurgia ao ano. Todavia, seu aproveitamento na agricultura ainda é pouco difundido (Prado e Fernandes, 2000). Essa abundância de material rejeitado pode ser de grande utilidade na agricultura, reduzindo o impacto ambiental e agregando valor ao subproduto.

A escória, além de ser considerada um material de baixo custo, pode ser uma alternativa visando auxiliar na adaptação das plantas a condições indesejáveis, aumento de produtividade e ajudando a manter uma produção mais sustentável (Seal et al., 2018), podendo apresentar, até mesmo, potencial de aumentar a captura de CO₂ na atmosfera (Chandrakala et. al, 2019).

A dissolução da escória no solo resulta em uma correlação positiva entre o Si extraível e o pH do solo corrigido pelo processo de liberação de ácido silicífico (H₄SiO₄) e hidroxilas (OH⁻) gerando um aumento no pH e no Si extraível (Haynes e Zhou, 2018). Dessa forma, pode ser utilizada como um agente de calagem alternativo em solos ácidos para neutralização da acidez e ainda fornecendo Ca (Ca₂SiO₄) para as plantas. Silicatos são compostos cristalinos ou amorfos contendo silício e dentre eles podemos citar o silicato de sódio, magnésio ou potássio. Todavia, por ser um subproduto industrial, pesquisas ainda são necessárias para verificação da presença de contaminantes (Heckman, 2013).

A presença de metais pesados no solo é um grande problema ambiental e no sistema produtivo em Si. Ali et al. (2013) em trabalho realizado com cevada sob estresse de cromo (Cr) observou que plantas tratadas com silício apresentaram menores distúrbios ultra estruturais causados pelo Cr, talvez pela menor absorção e acúmulo do metal. De acordo com Ma e Yamaji (2006) a deposição de Si nas raízes reduz o fluxo de desvio apoplástico e fornece locais de ligação para os metais, resultando na diminuição da absorção e translocação de metais tóxicos das raízes para os brotos.

2.3 Funções na planta

O Si está presente em quantidades equivalentes a vários macronutrientes dentro da planta, podendo até mesmo exceder em níveis mais altos (Epstein, 1999). A sua grande versatilidade pode proporcionar diversos benefícios para o crescimento vegetal, principalmente sob condições de estresse. Apesar da planta conseguir completar seu ciclo de vida sem ele, sua presença confere tolerância a vários estresses bióticos e abióticos (Zargar et al., 2019). Epstein (2009) ressalta que talvez o Si não seja considerado essencial porque em condições benignas ele quase não se apresenta.

Em meados do Século XIX os fisiologistas vegetais desenvolveram a técnica de cultura em solução e descobriram que não necessitavam incluir o Si na formulação de

soluções nutritivas, levando à conclusão que o nutriente seria supérfluo para fins de nutrição e crescimento. A omissão de Si em soluções nutritivas têm sido rotina desde então. Todavia, não existe planta sem Si na natureza e é provável que experimentos realizados em soluções convencionais sem silício possam levar a resultados enganosos (Epstein, 2009).

Plantas suplementadas por Si apresentam dois meios de defesa, físico e químico. O primeiro se dá pela deposição de sílica sólida amorfa hidratada (conhecida como opala ou fitólitos) na parede celular. O segundo se dá através de metabólitos secundários atraindo e repelindo insetos, atenuando danos causados por metais pesados, salinidade, seca, alagamento, temperaturas extremas etc (Epstein, 2009).

A resistência atribuída ao estresse ambiental tem sido bastante intrigante aos pesquisadores, pois ao contrário do que ocorre no ataque de organismos maléficos em que a planta contra-ataca, no estresse abiótico a planta realiza um tipo de defesa puramente unilateral (Epstein, 2009).

Além do papel do Si no aumento de resistência a estresses, este elemento também tem mostrado efeitos benéficos na estrutura física da planta, auxiliando, também, contra o ataque de pragas e doenças, redução do acamamento e melhoria da fotossíntese, proporcionando efeitos diretos e indiretos na produtividade final da cultura.

Johnson et al. (2019) analisando o efeito do aquecimento no desenvolvimento e absorção de silício perceberam maior taxa de crescimento da planta e maior resistência da folha em espécie de gramínea forrageira, o que culminou com o declínio acentuado no desempenho do herbívoro (*Helicoverpa armigera*), porém sem aumento significativo na concentração foliar de silício em temperatura ambiente, o que pode estar relacionado ao maior acúmulo de Si quando a planta estava em condição de estresse. O aumento da abrasividade entre 28 % e 52 % também foi notado por Massey et al. (2006) em cinco espécies de gramíneas analisadas.

Plantas com suprimento adequado de Si têm mostrado maior rigidez e crescimento mais ereto (Heckman, 2013). Esse tipo de característica na arquitetura pode beneficiar a planta em cultivos com alta aplicação nitrogenada, maiores densidades, visando evitar o sombreamento mútuo (Ma et al., 2006) além da melhoria da sua capacidade fotossintética, tendo em vista que folhas mais eretas recebem mais luz no limbo foliar, como observado por Najihah et al. (2015) quando compararam o efeito da aplicação de fertilizante silicatado em

condições de déficit hídrico ou estresse térmico observou que as taxas aumentadas de fotossíntese foram parcialmente devido à maior rigidez das hastes da planta com folhas mais eretas. Todavia, Deren (2001), em experimento com a cultura do arroz, percebeu que, apesar do maior acúmulo de biomassa, principalmente na produtividade de grãos, não houve aumento na taxa fotossintética.

O efeito de tecidos mais rígidos atribuído pela deposição de fitólitos na parede celular reduz o acamamento das plantas (Epstein, 1999). A deposição de Si nos colmos, folhas e casca, aumenta a resistência e rigidez das paredes diminuindo transpiração da cutícula, aumentando resistência à radiação UV e temperaturas desfavoráveis (Ma et al., 2006). No milho, o silício absorvido pelas raízes da coroa pode aumentar sua resistência mecânica nas bainhas e lâminas foliares (Mitani et al., 2009).

O silício também pode interferir diretamente na absorção, desenvolvimento e produtividade da cultura, como observado por de Souza et al. (2015) que verificaram maior velocidade de emergência, altura de planta, diâmetro de colmo, área foliar, matéria seca de parte aérea e de raiz no milho quando foram aplicadas as maiores doses de silicato. Em contrapartida, houve deficiência nutricional no tratamento controle (sem silício) observando-se estrias paralelas nas folhas e raízes acima do solo.

2.4 Defesas contra o ataque de pragas

Resultados benéficos tem sido evidenciados com a utilização de silício, auxiliando a planta não só fisicamente, pela formação de tecidos vegetais mais rígidos e abrasivos, danificando o aparelho bucal de insetos fitófagos, reduzindo a absorção de seiva (Jeer et al., 2017) e a herbivoria (Massey et al., 2006; Frew et al., 2019), mas também bioquimicamente pela alta expressão de genes codificadores de enzimas de defesa, como fenilalanina amônia liase, lipoxigenase e polifenos oxidase (Rahman et al., 2015) e pela indução ao acúmulo de lignina, componentes fenólicos e fitoalexina (Fawe et al., 2001). Esses componentes causam a redução da digestibilidade e palatabilidade, impactando a taxa de crescimento do inseto (Frew et al., 2016).

O silício tem mostrado eficiência, também, contra doenças fúngicas em diversas culturas. A formação de tecidos mais rígidos forma uma barreira física contra a penetração através de suas hifas (Francois et al., 2005). Dessa forma, pode se citar como exemplos o

potencial controle da doença da mancha da bainha do arroz, causada pelo fungo *Rhizoctonia Solani* (Ng et al., 2016), a maior resistência do tomate ao Fusarium (Huang et al., 2011) resistência à podridão basal do caule em Dendê (Najihah et al., 2015) ferrugem da folha em café, causada por *Hemileia vastatrix* (Carré-Missio et al., 2014), além de *Phytophthora* em pimenteiro (French-Monar et al., 2010).

No entanto, existem outras teorias em que eficiência ainda maior têm sido encontrada por meio da defesa bioquímica. Estudos recentes relataram que os mecanismos bioquímicos em comparação com os mecanismos físicos têm um papel mais importante no aumento da resistência da planta ao estresse (Ratnayake et al., 2016; Song et al., 2016) como melhoria no desempenho de quitinases (Cruz et al., 2013) β -1,3-glucanases (Tatagiba et al., 2014) peroxidase (Mburu et al., 2016; Dallagnol et al., 2011) polyphenol oxidases (PPO), oxidando componentes fenólicos a quitininas e biossíntese de ligninas, e phenylalanine ammonia lyase, envolvida na síntese de metabólitos secundários de defesa (Silva et al., 2010; Zhang et al., 2013; Song et al., 2016; Etesami e Jeong, 2018).

Alguns exemplos de resistência bioquímica incluem: controle de mancha cinzenta do azevém, causada por *Magnaporthe oryzae* (Rahman et al., 2015), redução de mancha alvo na soja, causada por *Corynespora cassiicola* pela indução de quitinases, β -1-3-glucanase, peroxidase, polyphenol oxidases e phenylalanine ammonia lyase (Fortunato et al., 2015) resistência do trigo à brusone, causada por *Pyricularia grisea*, pelo acúmulo de fenólicos e lignina (Filha et al., 2011), maior resistência a oídeos em *Arabidopsis*, causado por *Erysiphe cichoracearum*, pela biossíntese de etileno, ácido jasmônico e ácido salicílico (Fauteux et al., 2006) resistência a *Ralstonia solanacearum* em tomateiro, pela melhor regulação da expressão de genes envolvidos em sistema de defesa (Ghareeb et al., 2011). Todavia, ainda falta muita informação sobre os mecanismos que regulam a interação planta – microorganismos (Etesami e Jeong, 2018).

Todos esses benefícios podem auxiliar na redução do número de aplicações de fungicidas nas lavouras resultando em diminuição dos custos de produção e evitando uma provável ocorrência de população de patógenos resistentes (Resende et al., 2013).

2.5 Mecanismos de absorção

Muitas plantas apresentam uma quantidade significativa de Si em seus tecidos, embora essa quantidade varie significativamente com as espécies (Ma e Takahashi, 2002), podendo ser classificadas como acumuladoras ou não (Kaur e Greger, 2019). Em geral, as gramíneas absorvem mais silício do que as eudicotiledôneas (Ma e Yamaji, 2015). As gramíneas geralmente contêm alta concentração de Si, acima de 10 % de sua matéria seca, enquanto as leguminosas e as brássicas acumulam menos de 1 % (Cooke e Leishaman, 2016).

Uma vez absorvido pelas raízes, na sua forma de ácido silícico, é translocado para a parte aérea onde é polimerizado em sílica amorfa hidratada e depositado na parede celular como sílica cutícula e sílica celulósica dupla camada (Seal et al., 2018) agindo como uma barreira mecânica (Fauteux et al., 2005).

As plantas apresentam diferentes capacidades de absorção de silício (Leroy et al., 2019) e esta é afetada pela disponibilidade de água no solo (Jenkins et al., 2011). Uma das teorias é que o acúmulo de sílica seria controlado pela evapotranspiração e absorção pelas raízes (Ma et al., 2006). Ryalls et al. (2018) relataram que as respostas de absorção de Si foram aumentadas quando a disponibilidade de água no solo não foi um fator limitante. Da mesma forma, Henriot et al. (2006) observaram que mudas de bananeiras apresentaram absorção de Si proporcional à absorção de água. Essa ideia também foi mostrada em Johnson et al. (2019) em trabalho com gramínea de pastagem observaram que, quando em condições de aquecimento, a absorção de Si foi reduzida, provavelmente pelo menor teor de água no solo e redução da taxa de transpiração.

Atualmente, transportadores de Si ajudaram a entender melhor como ocorre o acúmulo na planta, porém esses mecanismos de absorção ainda precisam ser mais bem esclarecidos, pois é um processo complicado e controlado por vários genes (Ma et al. 2006, 2007). O que se sabe é que o mecanismo de absorção varia entre diferentes espécies de plantas e aparentemente dependa de transportadores específicos (Ma e Yamaji, 2015).

Dois tipos de transportadores foram identificados inicialmente na cultura do trigo, transportador Lsi 1, tipo canal de influxo (aquaporinas), auxilia o transporte passivo através da membrana plasmática e, transportadores de efluxo (Lsi 2) transportam de fora da célula da planta para o xilema (Ma et al., 2006). Diferenças no gradiente de concentração entre endoderme, exoderme, córtex e solução do solo conduz o influxo de Si através do Lsi1 (Seal

et al., 2018). Em seguida o silício é transportado como ácido monosilícico através de Lsi1 e Lsi2 para o estelo e chega à parte aérea via fluxo de transpiração pelo xilema (Mitani et al., 2005). A perda de água pela transpiração da planta resulta na concentração e conversão do Si em sílica amorfa, que se acumula em raízes, caules, cascas e parede celular das folhas, pelo processo de polimerização (Ma e Yamaji, 2008, 2015). A eficiência na absorção e o acúmulo de Si na planta depende da ação cooperativa entre esses transportadores (Ma, 2010). O transporte de H_4SiO_4 (ácido silicífico) via Lsi 1 e Lsi 2 deve garantir uma concentração menor que 2 micromolar nas células, acima disso o SiO_2 pode se polimerizar e se tornar tóxico para as plantas. (Exley, 2015; Islam et al., 2019).

Na cultura do milho já foram identificados dois genes pertencentes ao grupo NIP III de aquaporinas, o primeiro deles identificado como ZmLsi1, localizado nas células da epiderme e hipoderme das raízes seminais e nas células da epiderme e do córtex das raízes laterais, sendo um transportador de influxo de Si responsável pelo transporte da solução externa para as células radiculares, e o segundo como ZmLsi6, localizado nas células do parênquima do xilema, funcionando principalmente como um transportador de Si para o descarregamento do xilema (Mitani et al., 2009).

O Si é carregado contra um gradiente de concentração sendo absorvido pelas raízes como ácido silícico e carregado pelo xilema da mesma forma. Depois de translocado para o caule é concentrado com a perda de água (transpiração) e polimerizado em sílica (Mitani et al., 2005). Vale ressaltar que a deposição do Si pode se dar em diferentes quantidades nos diversos órgãos da planta. Henriot et al. (2006), em experimento com plantas de bananeiras, verificou um gradiente de concentração de Si ordenado, sendo o maior na lâmina foliar, seguido de pecíolo e nervura central, pseudocaule e raiz. Além disso, foi observado uma concentração maior nas folhas mais velhas em comparação às mais novas. De acordo com Ma et al. (2006) a maior parte do Si se acumula nos tecidos mais velhos, pois o elemento não é móvel dentro da planta.

A concentração de Si em solução também desempenha papel fundamental, como observado por Massey et al. (2006) em que o teor de sílica nas folhas foi muito maior para as maiores doses de Si, todavia a quantidade diferiu entre as espécies.

Acredita-se que vários transportadores estejam envolvidos, porém apenas alguns puderam ser identificados até o momento (Ma e Yamaji, 2015). A maioria dos estudos foi

realizado em espécies de monocotiledônes, que apresentam mais informações comparadas às eudicotiledôneas (Zargar et al., 2019). Estas também possuem capacidade de acumular, porém em quantidades muito pequenas e não se sabe se há transportadores envolvidos nessas espécies (Ma e Yamaji, 2008). Dessa forma, conhecer os mecanismos de absorção pode ser importante para manipulação genética e aumentar a eficiência (Ma et al. 2006), pois plantas melhoradas geneticamente em transportadores pode incrementar significativamente sua capacidade de absorver Si (Montpetit et al. 2012).

Vale ressaltar que o estágio fenológico da cultura também pode afetar brutalmente a capacidade de absorção. A voracidade das plantas pela absorção de Si foi mostrada por Rafi e Epstein (1999) na cultura do trigo quando mudas ainda pequenas não afetaram tanto a concentração de Si na solução nutritiva, no entanto, à medida em que foram crescendo, as plantas foram esgotando o Si cada vez mais rápido e no 84º dia não foi mais detectado.

2.6 Cultura do milho

O milho é uma das principais plantas cultivadas no Brasil e no mundo e, sua grande importância, se dá por ser fonte de carboidrato na alimentação humana e animal, seja na produção de grãos ou na produção de silagem, refletindo nas grandes áreas plantadas (de Souza et al., 2015).

O Brasil conta hoje com uma produção de 114,6 milhões de toneladas, 31,6 % a mais do que em 2020, e Minas Gerais representa 7,6 % desse total, o que o coloca como quinto maior produtor do país, ficando atrás, apenas dos estados do MT, PR, MS e GO, respectivamente. Em produtividade, o Estado está praticamente empatado com MT, 6.165 contra 6.189 kg ha⁻¹, respectivamente, ficando pouco atrás do DF, 6.352 kg ha⁻¹ (CONAB, 2022)

Nas últimas décadas a posição relativa do Brasil não mudou no que diz respeito à produção do cereal, mas cresceu nas exportações, tornando-se, atualmente, o segundo maior exportador de milho, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (Embrapa, 2021).

Essa expansão tem acompanhado um crescente aumento no custo de produção pelo uso de insumos (defensivos agrícolas, corretivos de solo, fertilizantes, sementes, etc.), que se tornou cada dia mais caro com a alta valorização do dólar. Pensando nisso, pesquisadores e agricultores têm procurado alternativas que promovam a redução desses custos.

O milho é uma cultura exigente em fertilidade e sensível a solos ácidos (Barros e Calado, 2014). Considerado uma cultura acumuladora de silício, a aplicação da escória

poderia fornecer cálcio e silício para a planta, melhorar as condições químicas do solo, aumentar a disponibilidade de fósforo, além do fornecimento de alguns micronutrientes, como como Cu, Zn e o B (Prado e Fernandes, 2001).

2.7 Cultura do feijão

O feijão é um dos alimentos mais cultivados no Brasil. Isso se deve pela grande importância não só como fonte de proteína na alimentação humana, mas também pelo seu aspecto econômico. Do ponto de vista nutricional o legume possui um aminoácido essencial, a lisina, que necessita ser combinado com a metionina, produzida pelo arroz (Carneiro, 2005). Ambas as culturas são tão importantes que foi criado um centro de pesquisa específico para as mesmas, Embrapa Arroz e Feijão.

O Brasil é o terceiro maior produtor e consumidor de feijão do mundo (FAOSTAT, 2020). Segundo dados da CONAB (2022), o Brasil produziu 3,1 milhões de toneladas de feijão na safra 2021/2022 e o Estado de Minas Gerais produziu 20 % desse montante com 462,6 mil toneladas, sendo o segundo maior produtor nacional, ficando atrás apenas do estado do Paraná, com uma produção de 781,9 mil toneladas.

A cultura acaba sendo prejudicada em avanços tecnológicos no tocante a defesa contra ataques de pragas e doenças por não ser uma “commoditie”. Tem sido um grande desafio buscar estratégias para uma agricultura com maior respeito ao meio ambiente, utilizando produtos com menos resíduos químicos, garantindo a produtividade.

O feijão é considerado uma cultura não acumuladora de silício (Lima et al 2011), todavia, alguns trabalhos têm mostrado resultados interessantes com a utilização de silicatos (Pohlmann et al., 2022; Silva et al., 2020; Nascimento et al., 2017).

A maioria das pesquisas tem sido realizadas com variedades de feijão Caupi em aplicações foliares ou em sistemas hidropônicos, pouco se tem informação com uso de silício em feijão carioquinha.

3.MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em campo experimental da Universidade Federal de São João del-Rei – campus Sete Lagoas, localizada a 19°28'40.296" S, 44°11'59.928" W e 747 metros de altitude. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distroférico típico (Embrapa, 1999). As condições de fertilidade do solo, antes da

implantação do experimento, e a precipitação ocorrida durante o ciclo da cultura se encontram na Tabela 1 e Figuras 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Resumo da análise de solo da área experimental da Universidade Federal de São João Del Rei – campus Sete Lagoas - MG anterior à implantação do experimento

Determinação	Unidade	Profundidade		
		0-20	20-40	
M.O.	Mat.Orgânica (Oxi-Red.)	dag dm ⁻³	2,8	2,0
pH	(água - Relação 1:2.5)	unid	5,6	5,3
P	(Mehlich-1)	mg dm ⁻³	7,2	6,7
K ⁺	(Mehlich-1)	mg dm ⁻³	47,0	25,0
Ca ²⁺	(KCl-1 mol/L)	cmol _c dm ⁻³	2,9	1,6
Mg ²⁺	(KCl-1 mol/L)	cmol _c dm ⁻³	0,4	0,1
Al ³⁺	(KCl-1 mol/L)	cmol _c dm ⁻³	0,1	0,4
H + Al	(Acetato de cálcio)	cmol _c dm ⁻³	4,4	5,3
S.B.	(Soma de bases)	cmol _c dm ⁻³	3,4	1,7
C.T.C.	(C.T.C.)	cmol _c dm ⁻³	7,8	7,1
V%	(Saturação de bases)	%	44,0	25,0

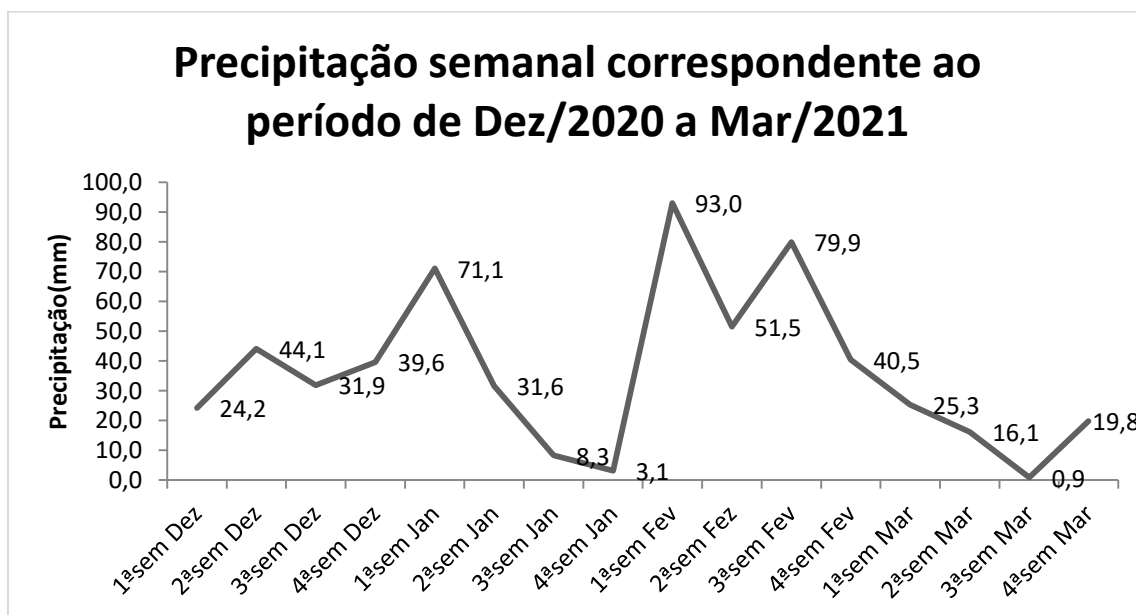


Figura 1. Dados de precipitação pluviométrica ocorrida durante o período de cultivo do milho - Dezembro de 2020 a Março de 2021. Fonte: Sparks A (2022). Nasapower.

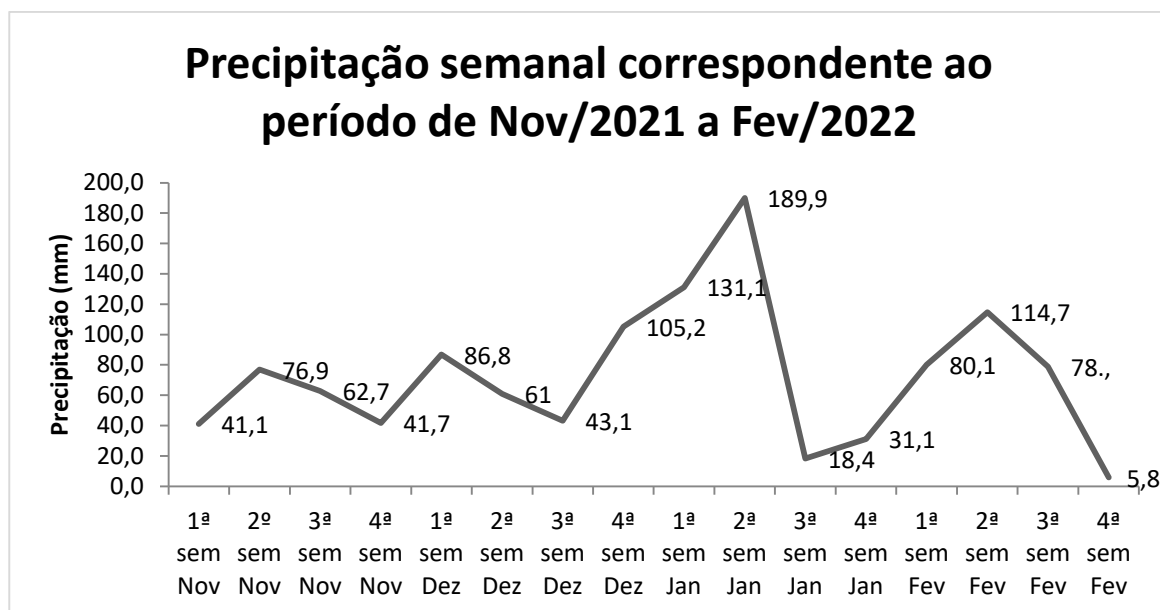


Figura 2. Dados de precipitação pluviométrica ocorrida durante o período de cultivo do feijão - Dezembro de 2021 a Março de 2022. Fonte: Sparks A (2022). Nasapower.

3.1 Preparo da escória

O material utilizado no experimento foi a escória de alto forno (Figura 3A), fornecido pela siderúrgica SAMA[®], localizada na cidade de Sete Lagoas-MG, produtora de ferro gusa.

Após a secagem, o material foi triturado em moinho de martelo e passado na peneira de 2 mm (Figura 3D-E), resultando em uma coloração mais escura, provavelmente proveniente de resíduos de carvão (Figura 3B). A escória foi pesada e separada, conforme os tratamentos para cada parcela (Figura 3F). Também foi reservada uma quantidade de 500 g (Figura 3C) do material para determinação de Si solúvel e PRNT, como complementação e análise descritiva do experimento.



Figura 3. A) Escória bruta, retirada da siderúrgica B) Escória após secagem e seleção na peneira de 2 mm C) Porção de escória reservada para análises complementares D) Moinho de martelo e peneira grossa para retirada do excesso de carvão E) Retenção de partículas maiores que 2 mm. Escória pesada e separada nas suas devidas doses para ser aplicada na linha de plantio como tratamentos.

3.2 Análise de PRNT (poder relativo de neutralização total)

O PRNT (Poder relativo de neutralização total), leva em consideração a capacidade do corretivo de neutralizar a acidez do solo (PN) e a reatividade do material, obtido por meio da granulometria do material.

Uma amostra da mesma escória aplicada nos tratamentos foi reservada para determinação do Poder de Neutralização, método de Granulométrica (2014) em titulação ácido-base.

A extração foi feita pesando-se 1g da escória, que foi transferida para erlenmeyer de 250 mL. Na vidraria, foram adicionadas 50 mL de HCl (0,5 molar) padronizada e foi levada ao aquecimento em chapa térmica por 5 minutos após atingir o ponto de ebulição. Após o resfriamento, a amostra foi filtrada e transferida para balão de 100 mL e seu volume foi completado com água. Em seguida, para a determinação, 50 mL das soluções-amostras foram pipetadas e acondicionadas em erlenmeyer de 125 mL. Procedendo-se a titulação ácido-base com NaOH 0,25 mol L⁻¹.

O percentual de CaCO₃ equivalente foi obtido pela expressão: $PN = 10(25.M1 - V2M2)$ G-1, em que: M1 é a concentração molar da solução de HCl, V2 é o volume gasto de solução NaOH em mL, M2 é a concentração molar da solução de NaOH e G é a massa inicial da amostra, em grama.

A reatividade depende fundamentalmente da granulometria do material, ela indica a capacidade de um corretivo reagir no solo e envolve a velocidade de reação e seu efeito residual. Para sua determinação seguiu-se a metodologia recomendada pela 5ª aproximação de Minas Gerais (Ribeiro et al., 1999) em que 80 g da escória preparada para aplicação no início do experimento foi pesada e, posteriormente, levada ao agitador de peneiras. As peneiras utilizadas foram ABNT 10, 20, 30 e 50. A reatividade obtida foi calculada considerando a média ponderada da eficiência relativa das classes das partículas retidas nas peneiras.

Os resultados da reatividade, poder de neutralização e PRNT encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Valores obtidos de reatividade, poder de neutralização e poder relativo de neutralização total da escória utilizada nos tratamentos, determinados em laboratório

Peneira ABNT	Média (g)	Percentual	RE%	PN%	PRNT%
Retido na 10	15,12	18,91	34,22	184,27	63,06
Passou na 10 e retida na 20	29,50	36,88			
Passou na 20 e retida na 50	34,29	42,86			
Passou na 50	0,81	1,01			
Total	79,72	99,65			

3.3 Extração de Si solúvel na escória

A determinação do Si solúvel na escória seguiu o método de Korndörfer (2004). Para isso, foi pesado 0,1 g da amostra de escória reservada das doses aplicadas nos tratamentos e acondicionado em tubo de polipropileno com tampa. Posteriormente, foram adicionadas, separadamente, 50 mL das soluções de Na₂CO₃ (10 g L⁻¹) e 50 mL NH₄Cl₂ (16 g L⁻¹), utilizou-se o cloreto de amônio, (reagente disponível), pois a função do nitrato de amônio é simplesmente fornecer prótons para a solução (Korndörfer, 2004). As amostras foram levadas para o agitador horizontal e permaneceram por 1 hora na velocidade de 150 rpm para extração do Si. Depois de agitadas, as amostras foram retiradas e deixadas em repouso por 5 dias, visando simular o comportamento da escória aplicada ao solo, ideia aproximada da velocidade

de liberação do silício (efeito imediato e residual). Em seguida, foi feita a determinação pipetando-se 10 mL do sobrenadante e depositado recipiente plástico de 50 mL com a adição de 10 mL de água destilada (proporção de 1:1).

Às amostras e à solução padrão, foram acrescentados 2 mL de solução sulfo-molíbdica (75g L^{-1}), alterando a coloração para amarelo e, após 10 minutos, também foi adicionado solução de ácido ascórbico, transformando o complexo para coloração azul. Depois de 1 hora em repouso, foram realizadas as leituras em espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm .

As doses aplicadas aos tratamentos, conforme a análise fornecida pela siderúrgica e a dose real de Si aplicado ao solo, conforme o teor médio de Si solúvel encontrado na análise encontram-se nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Teor médio de Si na escória utilizada como fonte de silício nos tratamentos

Si solúvel determinado na escória (mg g^{-1})	0,42
Teor de SiO_2 % fornecido pela siderúrgica	42,49

Tabela 4. Identificação dos tratamentos utilizados conforme a dose de Si desejada, a respectiva dose de escória a ser aplicada e a dose real de silício que foi aplicada ao solo conforme a determinação do teor de Si solúvel na escória

Tratamento	¹ SiO ₂ kg ha ⁻¹	² Dose de escória kg ha ⁻¹	³ Dose real de Si kg ha ⁻¹
T1	0	0	0
T2	50	119	0,050
T3	100	238	0,099
T4	200	476	0,199
T5	400	952	0,398
T6	800	1904	0,795

¹Dose do elemento Si desejada. ²Dose equivalente da escória considerando o teor de SiO₂ informado pela análise química fornecida pela siderúrgica. ³Dose real de Si aplicado ao solo considerando o teor médio de Si solúvel determinado na escória em laboratório.

3.4 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada bloco recebeu seis tratamentos distribuídos ao acaso (Tabela 4). As parcelas foram constituídas de sete linhas de 6 m, espaçadas em 0,5 m, totalizando 24 parcelas de 21 m². Para a cultura do feijão, as parcelas consistiram de sete linhas de 3 m de comprimento.

3.5 Preparo do solo, adubação e semeadura

Em fevereiro de 2021, foi realizado o plantio do milho, após preparo do solo, no mês de outubro de 2020, por meio de uma aração, seguido de duas gradagens e abertura dos sulcos de plantio (Tabela 5). Como um dos objetivos do trabalho foi avaliar a correção de acidez pela escória, não foi realizada calagem antes do plantio. Para suprir as necessidades da cultura, foi aplicado 356 Kg ha⁻¹ do formulado NPK 8-28-16, visando fornecer 100 Kg ha⁻¹ de P₂O₅. Posteriormente, o adubo de plantio foi coberto com pequena porção de solo e, também, na linha de plantio, por cima do adubo coberto, somente antes do primeiro plantio (milho), foi aplicada a escória em suas respectivas doses conforme os tratamentos distribuídos em suas respectivas parcelas (Tabela 4). A determinação das doses de escória ocorreu em função do teor de silicato (42,49 % de SiO₂) presente na análise química fornecida pela siderúrgica.

Após a colheita das espigas de milho, realizada no mês de junho de 2021, as plantas foram tombadas no solo para a decomposição da palhada e posterior reabertura manual dos sulcos para a semeadura do feijão. Em seguida, foi realizada uma adubação de plantio com 285 kg ha⁻¹ de adubo NPK 08-28-16, visando fornecer 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

A primeira cultura a ser implantada no experimento foi o milho, semeado no início de Fevereiro e colhido no início de Junho de 2021. Para a semeadura, foram utilizadas sementes de milho BM 709 convencional (Biomatrix®), na população recomendada de 70.000 plantas ha⁻¹. Foi utilizada irrigação convencional para os períodos com insuficiência de pluviosidade durante a condução do experimento.

A adubação de cobertura foi parcelada em duas vezes, primeiramente aplicada no estádio V4 e depois no estádio V8 da cultura nas doses de 297 Kg ha⁻¹ de NH₄SO₂ e 103 Kg ha⁻¹ de KCl para cada uma das duas aplicações.

As plantas de feijão foram semeadas 5 meses após o tombamento das plantas de milho na área. Foram utilizadas sementes do cultivar BRS FC 104 da Embrapa com densidade populacional, recomendada para o cultivar, de 220.000 plantas ha⁻¹ na mesma linha onde o milho foi plantado anteriormente, no intuito de que o feijão recebesse os mesmos tratamentos aplicados à cultura anterior.

A adubação de cobertura foi realizada no estádio V4 com 90 g de adubo NPK 20-0-20 na dose de 600 kg ha⁻¹, conforme recomendação de Ribeiro et al. (1999), considerando a produtividade máxima e densidade de 220.000 plantas ha⁻¹.

Tabela 5. Esquema cronológico das etapas de adubação, preparo do solo e plantio das culturas do milho e do feijão.

Preparo do solo	Preparo da escória	Aplicação das doses de escória	Plantio do milho	Primeira coleta de solo	Preparo da área do feijão	Plantio do feijão	Segunda coleta de solo
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Out/2020	Dez/2020	Dez/2020	Fev/2021	Jul/2021	Set/2021	Nov/2021	Abr/2022

3.7 Avaliações

As variáveis respostas analisadas para a cultura do milho foram altura da planta no florescimento, diâmetro do primeiro internódio, comprimento da espiga, quantidade de grãos por fileira, quantidade de fileiras por espiga, diâmetro da espiga, comprimento dos

internódios, diâmetro de colmo, diâmetro de sabugo, peso da palhada, massa de 100 grãos, produtividade final, quantidade de Si por grama de tecido foliar, teor de Si no solo e pH do solo nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

No momento em que a planta atingiu a maturidade fisiológica, foram obtidos dados de altura da espiga, comprimento e diâmetro de colmo do primeiro entrenó abaixo da espiga e posteriormente a colheita da espiga.

Para a mensuração da produtividade, foram coletadas espigas aleatoriamente da área útil de 9 metros lineares, correspondendo a 3 metros das 3 linhas centrais, deixando-se uma bordadura de aproximadamente 1,5 m. Após a colheita, 5 espigas de cada tratamento foram separadas ao acaso, para determinação dos dados de produtividade. Foram avaliados o peso médio de espiga e palha, comprimento da espiga, quantidade de grãos por fileira, quantidade de fileiras e diâmetro da espiga. Posteriormente, a região central da espiga foi debulhada manualmente e foram realizadas medidas de diâmetro médio de sabugo e massa de 100 grãos. Após a obtenção destes dados, foi realizada a trilhagem das espigas para a obtenção de produtividade total pesando-se todos os grãos coletados da área útil. A aferição de umidade foi realizada em medidor portátil “Agrologic® AL – 102” e, em seguida, foi feita a correção para 13 % de umidade, para obtenção da produtividade em kg ha⁻¹.

O feijão foi colhido após o período de maturação fisiológica dentro de sua área útil, descontando-se 50 cm em cada parcela para serem consideradas como área de bordadura. As plantas foram levadas ao galpão de máquinas do campus e lá foram retiradas, ao acaso, 10 plantas para determinação das variáveis de produtividade, sendo elas: número médio de vagens por planta, comprimento médio de vagem, número de grãos por vagem, peso de 100 grãos e peso de casca das vagens. Posteriormente foi feita a trilhagem das parcelas para determinação de produtividade total, que foi obtida considerando um teor de 13 % de umidade.

3.8 Teor de Si no tecido

Para a análise de tecido, foram retirados os terços médios de cinco folhas opostas à base da espiga superior de cinco plantas ao acaso na área útil de cada parcela na época do florescimento, excluindo-se a nervura central, segundo método de Cantarella et al. (1997). No momento de retirada das folhas, foram medidas a altura da planta da base até a inserção da folha “bandeira” e o diâmetro do primeiro entrenó acima da base (Tabela 6).

Para determinação do teor de silício no feijão, foram realizadas análises de tecido nas cascas das vagens e na planta inteira. Ambas foram secas em estufa a 60 °C até a obtenção de peso constante. Posteriormente foram trituradas e armazenadas em sacos de papel.

O material vegetal coletado passou por pré-tratamento de secagem em estufa a 60 °C por 48 horas. Após esse período, as folhas foram trituradas em moinho de faca e, posteriormente, foi coletado o peso de 0,1 g em balança de precisão para cada tratamento.

O material vegetal triturado foi acondicionado em tubo “falcon” de 125 mL para mistura dos reagentes e realização da digestão, seguindo a metodologia de Korndörfer et al. (2004), em peróxido de hidrogênio (H₂O₂) para oxidação do material vegetal e hidróxido de Sódio (NaOH) para melhoria da eficiência do oxidante e aumentar o pH da solução.

Os tubos, destampados, permaneceram por 1 hora de aquecimento em “banho-maria” a 90 °C para liberação dos gases. O aquecimento foi monitorado a todo momento para evitar o derramamento de material. Em seguida, os tubos foram tampados e acondicionados na autoclave, ficando por mais 1 hora à temperatura de 120 °C para finalização da digestão. Para obtenção do sobrenadante, foram adicionados 45 mL de água destilada, deixando-se os tubos em repouso até que qualquer resíduo sólido ficasse depositado no fundo dos tubos.

Para determinação da quantidade de Si presente em solução, foi acondicionado uma alíquota de 1ml do sobrenadante em copos plásticos de 50 mL, acrescidos de 19 mL de água.

A curva de determinação foi obtida com a adição de solução padrão de Silicato de Sódio, 99 % de pureza, nas concentrações de 0, 2, 4, 6 e 8 mg L⁻¹ de Si. Uma alíquota de 10 ml foi retirada de cada padrão e acondicionada em copo plástico de 50 mL.

Todas as amostras receberam 1 mL de ácido clorídrico (500 g L⁻¹) e 2 mL de molibdato de amônio (100 g L⁻¹), ficando a solução com coloração amarela (presença de Si). Após 10 minutos, foi adicionado ácido oxálico (75 g L⁻¹) para eliminar o efeito de ferro presente na solução.

Realizou-se, após 2 minutos, leitura em espectrofotômetro UV no comprimento de onda de 410 nm. Os valores de leitura de absorvância obtida pelo aparelho foram anotados e substituídos na equação da curva para obtenção em mg g⁻¹ de Si.

3.9 Análise de pH e do teor de Si solúvel no solo

Foram realizadas 2 coletas de solo em momentos distintos (tabela 5), a primeira após 8 meses da aplicação da escória e a segunda, 28 meses após, nas profundidades de 0-20 cm e de 20-40 cm em cinco pontos de cada parcela, constituindo uma amostra composta, totalizando 48 amostras.

Das amostras coletadas, foram realizadas as determinações de pH em água e a extração e determinação de Si solúvel no solo.

O solo coletado foi submetido ao pré-tratamento de secagem, destorroamento e seleção na peneira de 2 mm, obtendo-se, assim, vinte e quatro amostras de terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente, foram obtidas as leituras de pH em água e teor de Si disponível através de colorimetria, método azul, usando como extrator o CaCl_2 (Cloreto de Cálcio), em espectrofotômetro UV, comprimento de onda 660 nm (Korndörfer et al., 2004).

A determinação do pH em água seguiu a metodologia do manual do laboratorista, Profert (2005). Para a obtenção de volume padronizado de solo, 10 cm³ de TFSA foram “cachimbados” e acondicionados em frasco de 50 mL, adicionando-se, logo após, 25 mL de água destilada.

As amostras foram agitadas por 5 min a 200 rpm, ficando em repouso por 30 min, e posteriormente, após o período de espera, as amostras foram agitadas novamente para a realização da leitura com potenciômetro devidamente calibrado. de Si solúvel no solo

Para extração, foi coletado 10 g de TFSA e adicionado 100 mL de solução extratora CaCl_2 (0,01 mol L⁻¹) em frasco plástico de 150 mL. A mistura foi homogeneizada em agitador horizontal a 150 rpm durante 1 hora. Posteriormente, o material foi deixado em repouso por 15 min para decantação e filtragem. Após 12 horas de repouso, uma alíquota de 10 mL de cada amostra foi pipetada e colocada em copo plástico de 50 mL.

A curva de determinação foi obtida na mesma metodologia adotada para tecido vegetal, já citada no item 3.8.3, porém nas concentrações de 0; 0,4; 1,0; 2,0 mg L⁻¹.

Acrescentou-se aos copos plásticos das soluções padrão e das amostras 1 mL de solução sulfo-molíbdica (75g L⁻¹). Neste momento, o ácido orto-silícico (H_4SiO_4), forma mais simples e solúvel do Si, reagem com o molibdato, alterando a coloração para amarelo.

Após 10 minutos, foram acrescentados 2 mL de solução de ácido tartárico (200 mg L⁻¹) para complexação do fósforo disponível. Foi também adicionado, após 5 minutos, solução de ácido ascórbico, causando a redução do Si, transformando o complexo amarelo para a cor azul.

Decorrida 1 hora, foi realizada a leitura espectrofotômetro UV no comprimento de onda de 660 nm. Os valores observados de transmitância foram anotados e substituídos na equação da curva padrão para a obtenção da quantidade de Si presente nas amostras na unidade de mg g⁻¹.

4 Resultados e Discussão

4.1 Teor de Si solúvel no solo

O teor de Si solúvel no solo foi determinado para verificar se estava ocorrendo liberação do elemento, porém o resultado foi não significativo (Tabela 6). Também não houve variação de pH nas profundidades de 0 a 20 e 20 a 40cm (Tabelas 7 e 8). De acordo com Haynes e Zhou (2018) a dissolução da escória no solo resulta em uma correlação positiva entre o Si extraível e o pH, corrigido pelo processo de liberação de ácido silicílico (H₄SiO₄) e hidroxilas (OH⁻). No presente trabalho não houve correlação entre as duas variáveis (r=0,73), como pode ser observado nas figuras 4 A e B. As medidas observadas em análise realizada anterior e aquelas mensuradas 6 meses e 28 meses depois da aplicação da escória (média) nos mostram, descritivamente, que praticamente não houve alteração de pH entre o período anterior e pós-aplicação (Tabela 8).

Tabela 6. Resumo da análise de variância (ANOVA) para teor de Si na planta do milho e no solo submetidos às diferentes doses de silício.

FV	GL	Quadrados médios				
		SIL_TEC ¹ mg g ⁻¹	TEOR_SI_SOLO ² mg g ⁻¹		TEOR_SI_SOLO ² mg g ⁻¹	
			1 ^a coleta		2 ^a coleta	
			0-20	20-40	0-20	20-40
TRATAMENTOS	5	77,9477 ^{ns}	0,000009 ^{ns}	0,000004 ^{ns}	0,000018 ^{ns}	0,000007 ^{ns}
BLOCOS	3	70,1027	0,000001	0,000003	0,000013	0,000013
RESÍDUO	15	51,8231	0,000006	0,000003	0,000024	0,000004
MÉDIA		25,88	0,008300	0,004900	0,023246	0,019058

CV (%)	27,81	28,73	32,79	21,29	10,91
--------	-------	-------	-------	-------	-------

¹ Teor de silício na folha da planta. ² Teor de Si encontrado no solo na camada de 0-20 cm. ^{ns} Resultado não significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

Tabela 7. Resumo da análise de variância (ANOVA) do efeito das doses de escória (tratamentos) no pH do solo em duas profundidades e duas coletas realizadas em períodos distintos

FV	GL	Quadrados médios			
		pH 1ª coleta		pH 2ª coleta	
		0-20	20-40	0-20	20-40
		Unid.	Unid.	Unid.	Unid.
TRATAMENTOS	5	0,0535 ^{ns}	0,0573 ^{ns}	0,0909 ^{ns}	0,0984 ^{ns}
BLOCOS	3	0,0169	0,0358	0,0223	0,0910
RESÍDUO	15	0,0532	0,0197	0,0268	0,0410
Média		5,75	5,24	5,89	5,26
CV %		4,01	2,68	2,78	3,85

Tabela 8. Valores médios de pH em água de amostras de solo retiradas nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, antes e depois da aplicação da escória no solo

Período	0-20 cm	20-40 cm
Antes	5,6	5,3
Seis meses depois (média)	5,7	5,2
28 meses após (média)	5,8	5,2

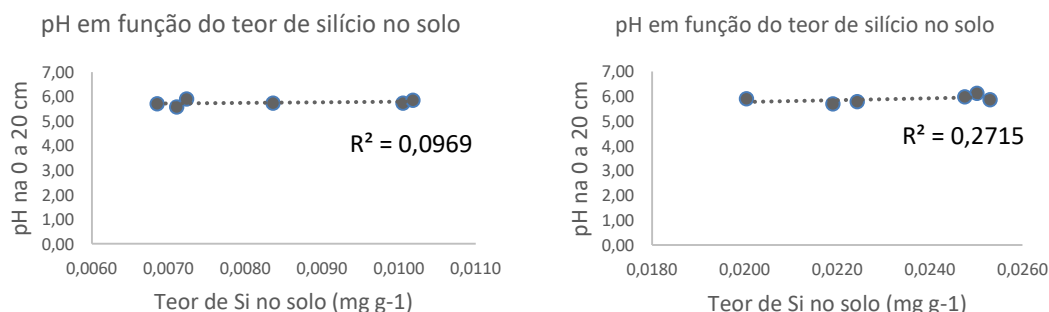


Figura 4. Correlação entre os valores de pH encontrados no solo, na camada de 0-20 cm de profundidade e o teor médio de silício disponível no solo após 6 meses após a aplicação da escória no solo (A) e após 16 meses da aplicação da escória no solo (B).

O teor de silício solúvel encontrado no solo apresentou valores maiores do que aqueles encontrado por Camargo et al. (2007), variando de 1,7 a 1,4 mg kg⁻¹, utilizando o mesmo extrator e o mesmo tipo de solo. Pereira (2007) menciona que o tipo de extrator utilizado pode liberar maiores ou menores quantidades de Si para a solução. O ácido acético, por exemplo, possui uma capacidade muito maior de extração do Si solúvel comparado ao CaCl₂.

As escórias de alto forno são constituídas em sua maior parte de aluminossilicatos de cálcio sob a forma vítrea (John e Agopyan, 2000), esse silício é mais solúvel em pH baixo (Pereira, 2007), fazendo com que essas fontes liberem mais Si quando se utiliza um extrator ácido, reduzindo a confiabilidade do mesmo, tendo em vista que retira maiores quantidades de fontes de baixa solubilidade. Assim, apesar do CaCl₂ mensurar uma menor quantidade de Si presente no solo ele quantifica a quantidade de Si disponível, em contrapartida o ácido acético indica que o Si solubilizado se origina de polímeros simples.

O Poder de Neutralização de 184,27 % (Tabela 2) apresentou valor muito superior ao comumente encontrado em trabalhos realizados com o rejeito, que normalmente varia de 60 a 90 % (Corrêa et al., 2007; Prado e Fernandes, 2000; Veloso et al., 1992; Raij et al., 1968), indicando um alto potencial para a correção de acidez no solo, porém vários outros fatores estão envolvidos na eficiência do material, como condições do solo, granulometria, estrutura cristalina e presença de impurezas. Dessa forma, o tempo de reação também é parte fundamental no processo, podendo ser maior ou menor, dependendo das condições climáticas, do tipo de solo e do tipo de escória a ser utilizada (Prado e Fernandes, 2000).

Prado e Fernandes (2000), visando avaliar se a recomendação de correção baseada no poder de neutralização adotado para o calcário seria compatível para a escória de siderúrgica em casa de vegetação, ambos com PN e PRNT muito próximos, reatividade de 100 %, e notaram que, quando a dose recomendada para alcançar uma saturação por base (V %) de 50 % foi dobrada, o calcário foi significativamente mais eficiente do que a escória na correção do pH em Latossolo Vermelho, efeito este que não era o esperado, pois as doses empregadas eram equivalentes em CaCO₃, indicando que a recomendação através do PN não seria o ideal para a recomendação de escória. Todavia, além do efeito do solo, o tipo de escória também pode provocar diferenças na sua solubilidade, influenciando, conseqüentemente, na determinação do PN.

Os percentuais de grânulos passados nas peneiras não atingem os valores mínimos exigidos pela legislação, em que 70 % devam passar pela peneira ABNT 20 e 50 % na ABNT

50 (Ribeiro et al., 1999). Dessa forma, o PRNT encontrado foi mais devido ao Poder de Neutralização alto do que à reatividade do material. De fato, pôde-se observar que o teor de silício encontrado na escória deste experimento, 410 mg dm^{-3} , apresentou valor 46 % acima dos 280 mg dm^{-3} encontrado por Prado et al. (2001). Curiosamente, a diferença da reatividade encontrada pelo mesmo autor, 79,4 %, e à encontrada na escória deste experimento, 34,22 %, foi de 45,18 %, valor muito próximo aos 46 % de diferença do teor de silício presente nas duas escórias.

A legislação determina que o calcário deva apresentar características mínimas, no tocante ao poder de neutralização e reatividade para ser comercializado, já a exigência mínima da escória de siderurgia está restrita apenas ao poder de neutralização (Prado et al., 2004). Pereira et al. (2010), ressaltam que as escórias de alto forno apresentaram baixa reatividade (60 %), mesmo em granulometria menor que 0,3 mm, assim, para correção igual ao calcário, seria necessária uma moagem mais fina da escória.

Deus et al. (2010), em experimento realizado em casa de vegetação, comparando doses de escórias com Wollastonita e calcário dolomítico, encontrou resultados similares entre calcário e escórias de siderúrgica, aplicadas em latossolo vermelho distrófico, na correção da acidez do solo e maior produção de matéria seca na cultura da alfafa na utilização para a escória, todavia, há de se observar que o percentual de grânulos que passaram na peneira ABNT 50 foi acima de 50 %, o que não ocorreu no presente trabalho.

Analisando-se o teor de Si no solo, 28 meses após a aplicação das doses, percebe-se que também não houve diferença significativa entre os tratamentos nas profundidades de 0-20 cm, bem como 20-40 cm. O resultado não era esperado, devido ao longo período em que a escória teve para reagir no solo e aos altos índices de precipitação que ocorreram naquela época. Todavia, o teor de Si encontrado no solo, $23,25 \text{ mg kg}^{-1}$, para o extrator cloreto de cálcio, apresentou resultado superior ao encontrado por Pereira et al. (2007) em que variou de 0,85 a $3,38 \text{ mg kg}^{-1}$. Além disso, Ramos et al. (2006) observaram que os silicatos estudados (silicato de Ca, silicato de Ca e Mg e termofosfato) promoveram a correção da acidez do solo com maior eficiência que o calcário, até à camada de 0-15 cm de profundidade, fato este que pode ter influenciado na quantidade encontrada neste trabalho, tendo em vista que a profundidade de 0-20 cm pode ter diluído uma quantidade que estava concentrada na camada mais superficial.

4.2 Crescimento e Produtividade no milho

Os resultados da análise de variância relativos às variáveis de crescimento e produtividade do milho estão apresentados nas tabelas 9 e 10. As análises mostram que não houve diferença significativa nas variáveis em resposta às doses de escória. Os resultados diferem daqueles encontrados por Souza et al. (2015) que verificaram maior velocidade de emergência, altura de planta, diâmetro de colmo, área foliar, matéria seca de parte aérea e de raiz no milho quando foram aplicadas as maiores doses de silicato.

A produtividade média obtida (6.945 kg ha⁻¹) foi acima da média nacional de 4.366 kg ha⁻¹ na safra 2020/2021 (Conab, 2021), ou seja, para uma cultivar convencional tivemos uma produtividade 59 % acima da média nacional.

Tabela 9. Resumo da análise de variância (ANOVA) para variáveis de crescimento do milho com aplicação de doses de escória como fonte de Si

FV	GL	QUADRADOS MÉDIOS (QM)				
		ALT_FLO ¹ (cm)	DIA_1ENT ² (cm)	ALT_ESP ³ (cm)	COMP_INT ⁴ (cm)	DIAM_COL ⁵ (cm)
TRATAMENTOS	5	208,11 ^{ns}	6908,00 ^{ns}	53,35 ^{ns}	1,44 ^{ns}	1,92 ^{ns}
BLOCOS	3	175,77	0,99	32,25	1,72	0,09
RESÍDUO	15	80,44	1,55	28,22	0,57	1,81
MÉDIA		186,60	18,64	90,79	19,84	17,62
CV (%)		4,81	6,67	5,85	4,45	8,87

¹ Altura da planta no florescimento. ² Diâmetro do 1 internódio. ³ Altura de inserção da primeira espiga.

⁴ Comprimento de internódio abaixo da primeira espiga. ⁵ Diâmetro de colmo.

Tabela 10. Resumo da análise de variância (ANOVA) para variáveis de produção do milho.

FV	GL	QUADRADOS MÉDIOS (QM)							
		COMP_ESP ¹ (mm)	GRÃOS_FIL ² (Unidade)	FIL_ESP ³ (Unidade)	DIAM_ESP ⁴ (mm)	DIAM-SBG ⁵ (mm)	PESO_PLH ⁶ (g)	M100G ⁷ (g)	PROD_FINAL ⁸ (kg ha ⁻¹)
TRATAMENTOS	5	0,93 ^{ns}	1,24 ^{ns}	1,5 ^{ns}	4,78 ^{ns}	1,48 ^{ns}	208,29 ^{ns}	5,86 ^{ns}	1.864.907,37 ^{ns}
BLOCOS	3	2,86	5,80	0,08	8,45	3,11	152,30	11,69	2.518.513,92
RESÍDUO	15	1,76	3,07	0,40	2,94	0,92	196,12	3,00	1.871.562,76
MÉDIA		15,63	27,9	16,33	48,06	29,90	93,08	25,73	6.945
CV (%)		8,49	6,28	3,87	3,57	3,2	15,055	6,73	17,77

¹ Comprimento de espiga. ² Grãos por fileira ³ Fileira por espiga. ⁴ Diâmetro da espiga. ⁵ Diâmetro de sabugo. ⁶ Peso de palha. ⁷ Massa de 100 Grãos ⁸ Produtividade Final.

O teor de Si na folha também não apresentou resposta significativa na análise de variância (Tabela 6). Considerando o silício que já estava presente no solo, também não houve correlação com o teor na folha de milho (Figura 5). Pereira (2007) encontrou correlação entre o teor no solo e o teor foliar de Si, todavia, a concentração do elemento encontrado no solo pelo autor foi na ordem de 10 vezes menores, 0.00085 a 0.00338 mg g⁻¹, do que no presente estudo. Dessa forma, o teor aqui encontrado, já presente no solo, pode ser suficiente para a absorção pela planta, o que fez com que ela não respondesse ao aumento da quantidade de Si presente no solo.

O teor de Si médio foliar de 25,88 mg g⁻¹ observado pode ser considerado médio (entre 17 a 34 mg g⁻¹) de acordo com a classificação de Korndörfer et al. (1999c) e representa 2,6 % da matéria seca. Esse valor chega a ser tão alto quanto de macronutrientes, como o cálcio, magnésio e fósforo, situação já relatado por Epstein (1999) quando diz que o silício está presente em quantidades equivalentes a vários macronutrientes dentro da planta, podendo até mesmo exceder em níveis mais altos. Todavia, todo o Si que foi absorvido, de alguma forma, já estava presente no solo, já que não houve diferença entre os tratamentos.

O teor médio de Si no tecido do milho nas diferentes doses de escória apresentou valor 3,36 vezes maior do que aquele observado por Freitas et. al (2011), que obteve resultado significativo quando aplicou KSiO (12 % de Si) via foliar na dosagem de 0,22 kg ha⁻¹. Uma pergunta intrigante seria, como o teor de Si solúvel na escória e no solo é tão baixo e a planta apresenta valores tão altos? Estudo de Pereira (2007) também encontrou resultados bastante semelhantes em seu experimento. Visando avaliar sete extratores e vinte e cinco fontes de Si (dose de 250 kg ha⁻¹) em casa de vegetação na cultura do arroz, o autor observou que, quando o CaCl₂, o mesmo extrator usado no presente trabalho, foi utilizado na obtenção de Si solúvel no solo o valor calculado foi ainda menor do que a média observada para o teor no solo do presente estudo (Tabela 6). Uma das possíveis explicações seria que a acidificação do solo em torno da rizosfera favoreceria a liberação de ácido silícico do solo, o que não ocorre na extração em meio básico do laboratório. A correlação utilizada pelo autor também observou que mesmo com baixos teores de silício no solo o teor na planta se manteve alto. Fazendo-se uma simulação com a equação de correlação encontrada pelo autor, utilizando-se um conteúdo de Si no solo médio de 8,21 mg kg⁻¹ tem-se uma resposta de 84,63 mg g⁻¹ de Si na planta, teor 3,27 vezes maior ao encontrado no presente trabalho. Kordnofer (2004) cita que o

Si se acumula nos tecidos de todas as plantas, apresentando valores entre 10 e 100 mg kg⁻¹ das mesmas, corroborando ainda mais que o teor se encontra dentro do parâmetro esperado.

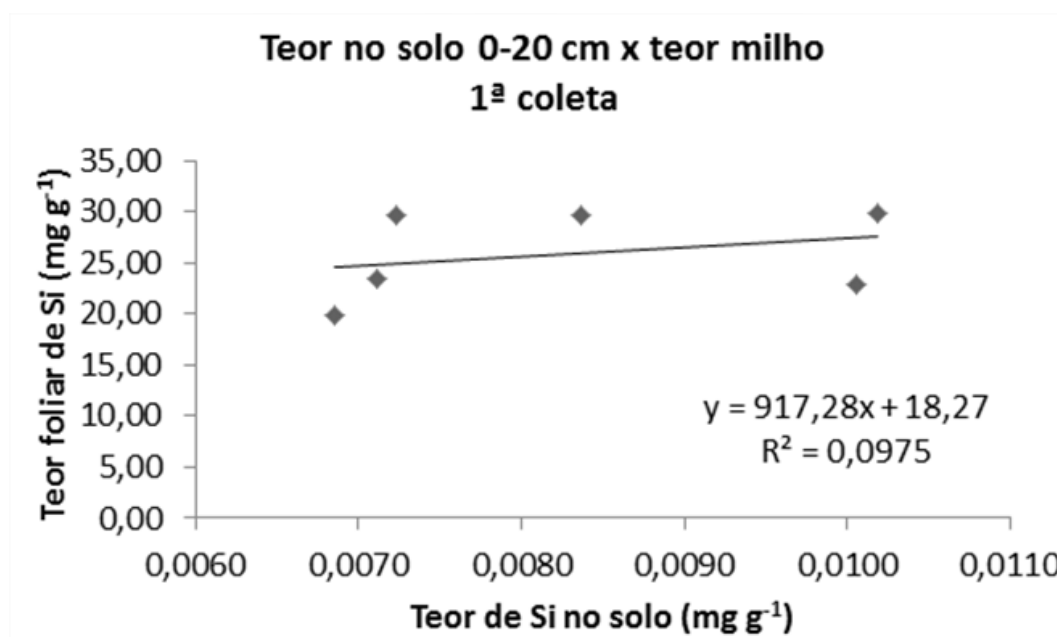


Figura 5. Correlação entre o teor médio de Si observado na folha do milho e o teor médio de Si encontrada no solo.

4.3 Produtividade do feijão

Pode-se observar na tabela 11 que nenhuma das variáveis relativas à produtividade do feijão apresentou resultado significativo, todavia, os valores encontrados, foram bem próximos àqueles obtidos por Lacerda et al. (2019), em que o número médio de vagens por planta foi 12,47, número de grãos por vagem 4,48, massa de 100 grãos, 36,78 gramas, e produtividade de 1.985 kg ha⁻¹.

Não foi possível determinar o teor de Si na planta de feijão, pela metodologia aplicada, pois os teores estavam abaixo do limite de detecção do equipamento. “Não existe planta sem Si na natureza” (Epstein, 2009).

Embora algumas eudicotiledoneas possam acumular Si, não se sabe se há transportadores envolvidos nessas espécies (Ma e Yamaji, 2008). O Si é absorvido pelas raízes e carregado contra um gradiente de concentração até a região do caule ou folha onde é polimerizado com a perda de água (Mitani et al., 2005). A alta precipitação ocorrida no período do feijão reduziu a evapotranspiração, o que dificultou ainda mais a deposição de fitólitos nos tecidos, já que os mesmos polimerizam com a perda de água.

Algumas plantas eudicotiledôneas possuem certa capacidade de absorver Si, como é o caso do tomate, dendê, café e pimenteiro (Huang et al., 2011; Najihah et al., 2015; Carré-Missio et al., 2014; French-Monar et al., 2010), porém sabe-se que os mecanismos de absorção variam entre diferentes espécies de plantas e aparentemente dependa de transportadores específicos (Ma e Yamaji, 2015). O grupo das eudicotiledôneas ainda é muito carente de informação sobre o assunto. A maioria dos estudos foram realizados em espécies de monocotiledônes (Zargar et al., 2019).

Um dos fatores que podem ter influenciado na não absorção pela planta foi o alto índice de pluviosidade ocorrido no período. A planta geralmente responde melhor à adubação silicatada quando está passando por algum tipo de estresse hídrico (Pohlmann et al 2022, Crusciol et al, 2013). Além disso, a deposição de fitólitos depende da transpiração da planta, ou seja, como a umidade relativa do ar estava alta, a planta transpirou menos. Matchi et al. (2016) mostraram que espécimes de *P. pedicellatum* acumularam mais sílica quando em climas mais secos do que na zona úmida, menor evapotranspiração, reforçando a ideia do fluxo transpiratório para absorção de Si.

Tabela 11. Resumo da análise de variância (ANOVA) para variáveis de produtividade do feijão cultivado sobre os diferentes tratamentos de doses de escória de siderúrgica aplicada ao solo

FV	GL	Quadrados Médios					
		Vg/planta ¹ (cm)	Comp de vg ² (cm)	N_grãos- vg ³ (cm)	P_100G ⁴ (cm)	Peso_de_Vg ⁵ (cm)	Prod ⁶ kg ha ⁻¹
TRATAMENTOS	5	0,1567 ^{ns}	0,0687 ^{ns}	0,1116 ^{ns}	0,9752 ^{ns}	5,0182 ^{ns}	742570,9842 ^{ns}
BLOCOS	3	4,1581	0,0847	0,0990	1,2008	20,8327	419416,8635
RESÍDUO	15	6,1404	0,0266	0,0764	1,7243	8,4714	296577,1626
MÉDIA		14,5637	10,2629	4,7854	20,57683	23,6930	1.883,484
CV (%)		17,01	1,59	5,77	6,38	12,28	28,91

¹Quantidade média de vagens por planta. ²Comprimento de vagem. ³Número de grãos por vagem

⁴Peso de 100 grãos. ⁵Peso de vagem. ⁶Produtividade total.

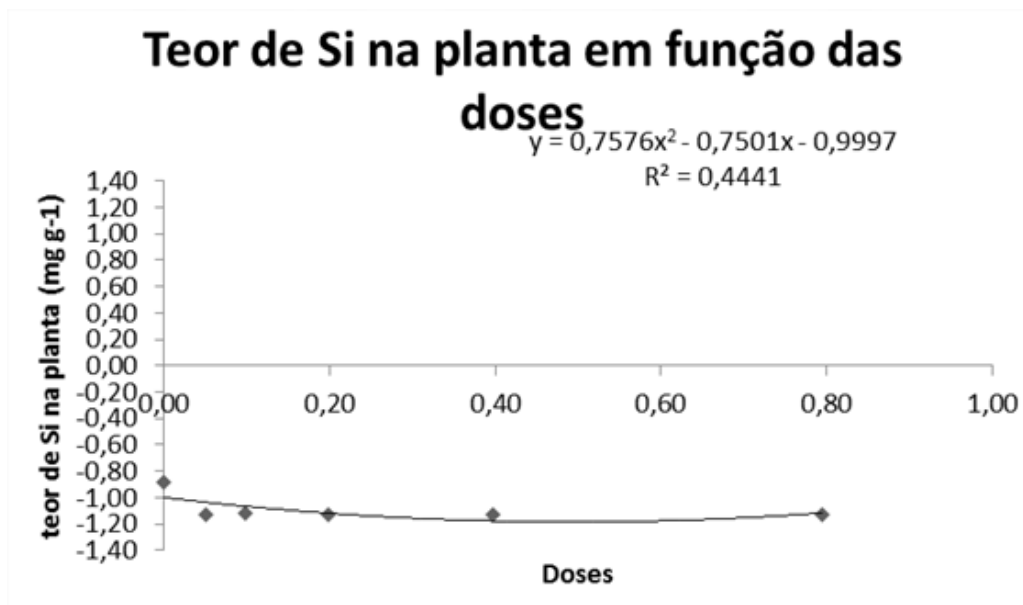


Figura 6. Teor médio de silício no feijão em função das doses de Silício aplicadas ao solo.

O alto índice pluviométrico também prejudicou a produtividade. O feijão é uma cultura sensível a condições de alagamentos (Custódio et al., 2002). A média de 1.883 kg ha⁻¹ foi acima da média nacional de 1.500 kg ha⁻¹ para o mesmo período (Conab, 2022), porém estima-se um potencial para o cultivar utilizado no experimento muito acima do encontrado, 3.792 kg ha⁻¹ (Embrapa, 2022). A precipitação durante o ciclo da cultura, novembro de 2021 a fevereiro de 2022, bateu recordes históricos (Conceição, 2021,2022), o valor acumulado no período chegou a 1168 mm (Figura 2). A época de colheita coincidiu justamente com o período em que ocorreu o pico de precipitação, 426,2 mm no período de 1° a 30 de janeiro, valor muito acima ao ano anterior, que somou 118 mm para o mesmo período. O excesso de chuva, principalmente na época da colheita, é altamente prejudicial à qualidade dos grãos, podendo provocar deterioração dos mesmos. Dependendo do período de duração, as perdas podem ser totais (Caramori et al., 2001).

O tipo de solo também deve ser levado em consideração. Estudo de Souza et al. (2015) obtiveram resultados significativos nos parâmetros morfológicos da planta, assim como na sua velocidade de emergência quando aplicou o Agrossilício (CaO 35 %, MgO 10 % e SiO₂ 22 %) via solo em um Neossolo Quartzarênico de textura média. Todavia, este tipo de solo apresenta respostas mais favoráveis à aplicação de Si comparado ao Latossolo Vermelho

Amarelo Distrófico (Embrapa, 1999) utilizado neste experimento. Isso ocorre, provavelmente, pela maior retenção de silicatos nos colóides do solo, como mencionado por Haynes e Zhou (2018). Mauad et al. (2003), avaliando efeitos de doses de Si e N em Latossolo Vermelho Distrófico, também não encontraram resultado significativo para matéria seca e produtividade em plantas de arroz cultivadas em vasos utilizando doses de Wollastonita como fonte de silicato. Apesar deste solo apresentar características semelhantes ao utilizado no presente estudo, houve uma interação significativa entre as doses de Si e N, mostrando uma forte relação inversamente proporcional de competição entre os dois nutrientes.

A baixa solubilização da escória no solo pode ter sido limitante para a absorção maior ou menor pelas plantas. A utilização de fontes mais solúveis pode apresentar resultados diferentes destes apresentados. Outra estratégia que poderia ser eficiente seria o uso de bactérias solubilizadoras de silicatos no solo (Lee et al., 2019), bem como intervenções físicas e químicas na pré-aplicação do resíduo (Chandrakala et. al, 2019). Além disso, Johnson et al., (2019) citam que maiores acúmulos de Si ocorrem quando a planta está passando por situação de estresse, o que não ocorreu no presente estudo, tendo em vista que a planta foi irrigada durante todo o seu ciclo. Estudos relacionados a mecanismos de absorção podem explorar ainda mais a eficiência da planta através do melhoramento genético (Ma et al., 2006) e aumentar a capacidade transporte de Si (Montpetit et al., 2012).

5. Considerações finais

Ao contrário das monocotiledôneas, ainda não se tem encontrado valores altos de acumulação de silício para a maioria das eudicotiledôneas a ponto de apresentar quantidade suficiente para ser benéfico para as plantas (Abdalla,2011). Além disso, têm-se observado que a eficiência do silício é maior quando a planta está passando por alguma condição de estresse biótico (Crusciol et al, 2013; Nascimento et al., 2017) ou abiótico (Hattori, 2005; Lima et al.,2011).

O silício é um elemento muito abundante no solo, assim, plantas sob condições naturais parece não sofrer com deficiência do elemento (Epstein, 2009), embora algumas culturas, como a cana de açúcar e o arroz, apresentem resultados positivos com a adição de fertilizantes silicatados.

O conhecimento sobre utilização de escórias de siderúrgica com fonte de silício ainda é muito limitado. Tratamentos físicos e químicos podem ser importantes para a melhoria da eficiência do rejeito, porém, uma padronização desses processos precisa de estudos cautelosos, pois rejeitos industriais apresentam alta variabilidade em sua composição química.

A escória é uma das fontes mais abundantes e de baixo custo de silicatos no Brasil. Embora exista a wollastonita, provinda de uma rocha com extração semelhante à do calcário, a mesma não é comercialmente explorada no Brasil, sendo sua comercialização dependente de importações. Além disso, algumas escórias têm a vantagem de apresentar alguns micronutrientes, como Cu Zn e B (Prado et al., 2001).

6 Conclusões

As doses de escória não corrigiram a acidez do solo, não influenciou a produtividade, também não aumentou o teor de Si na planta e nem no solo.

A planta de milho apresentou potencial de absorção, translocação e polimerização de silício, diferentemente do feijão, que não foi possível observar nenhuma absorção.

O pH do solo não sofreu alteração pela não reatividade da escória.

A escória utilizada nas condições do experimento não apresenta solubilização eficiente.

7 Referências Bibliográficas

Barros, J. F., & Calado, J. G. (2014). **A cultura do milho**. Universidade de Évora. Escola de ciências e Tecnologia. Departamento de fitotecnia.

Camargo, M. S. D., Korndörfer, G. H., & Pereira, H. S. (2007). Solubilidade do silício em solos: influência do calcário e ácido silícico aplicados. **Bragantia**, 66, 637-647.

Cantarella, H.; RAIJ, B. Van.; Camargo, C.E.O. Cereais. In: Raij, B. Van.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (Eds.). **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p.45-71 (Boletim técnico, 100).

Caramori, P. H., Gonçalves, S. L., Wrege, M. S., CAVIGLIONE, J., OLIVERIA, D., FARIA, R. D., & Bianchini, A. (2001). Zoneamento de riscos climáticos e definição de datas de semeadura para o feijão no Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 9(3), 477-485.

Carneiro, H. S. (2005). Comida e sociedade: significados sociais na história da alimentação. **História: questões & debates**, 42(1).

Carré-Missio, V., Rodrigues, F. A., Schurt, D. A., Resende, R. S., Souza, N. F. A., Rezende, D. C., & Zambolim, L. (2014). Effect of foliar-applied potassium silicate on coffee leaf infection by *Hemileia vastatrix*. **Annals of applied biology**, 164(3), 396-403.

Carvalho, R., Furtini Neto, A. E., Curi, N., Fernandes, L. A., & Oliveira Jr, A. C. (2000). Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24, 69-74.

Cessa, R. M. A., Novelino, J. O., Vitorino, A. C. T., & Mauad, M. (2011). Absorção de fósforo e crescimento do Sorgo em função da aplicação de silício e fósforo em Latossolo Vermelho distroférrico. **Revista de Ciências Agrárias**, 34(1), 135-142.

Chandrakala, C., Voleti, S.R., Bandeppa, S. et al. Silicate Solubilization and Plant Growth Promoting Potential of *Rhizobium* Sp. Isolated from Rice Rhizosphere. **Silicon** 11, 2895–2906 (2019).

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira: grãos 2021/2022**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/39691_7cfce4cdbe69deafc9a9a0cad72d554d>. Acesso em: 27 nov. 2021.

Conceição, M. A. F. (2022). **Chuvas em dezembro superam a média**.

CONCEIÇÃO, M. (2021). **Total de chuvas em outubro bate recorde histórico**. Embrapa Uva e Vinho-Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E).

CONCEIÇÃO, M. (2021). **Chuvas em novembro superam a média mensal**.

Cooke, J., & Leishman, M. R. (2016). Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. **Functional Ecology**, 30(8), 1340-1357.

Corrêa, J. C., Büll, L. T., Crusciol, C. A. C., Marcelino, R., & Mauad, M. (2007). Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 42, 1307-1317.

Cruz, M. F. A. D., Rodrigues, F. Á., Polanco, L. R., Curvêlo, C. R. D. S., Nascimento, K. J. T., Moreira, M. A., & Barros, E. G. (2013). Inducers of resistance and silicon on the activity of defense enzymes in the soybean-*Phakopsora pachyrhizi* interaction. **Bragantia**, 72, 162-172.

Custódio, C. C., Machado Neto, N. B., & Vivan, M. R. (2002). Efeito da submersão em água de sementes de feijão na germinação e no vigor. **Revista Brasileira de Sementes**, 24, 49-54.

da Silva Sandim, A., Ribon, A. A., Diogo, L. O., & Savi, M. A. (2010). Doses de silício na produtividade do milho (*Zea mays* L.) híbrido simples na região de Campo Grande-MS. **Revista Cultivando o Saber**, 3(1), 171-178.

Dallagnol, L. J., Rodrigues, F. A., DaMatta, F. M., Mielli, M. V., & Pereira, S. C. (2011). Deficiency in silicon uptake affects cytological, physiological, and biochemical events in the rice-*Bipolaris oryzae* interaction. **Phytopathology**, 101(1), 92-104.

de Souza, J. P. F., Martins, G. L. M., Pereira, A. C., da Silva Binotti, F. F., & Maruyama, W. I. (2015). Efeito de silicato de cálcio e magnésio no crescimento inicial de milho transgênico. **Revista de Agricultura Neotropical**, 2(3), 13-17.

DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Aluminium toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 107, p. 315-321, 1995.

Deren, C. W. (2001). Plant genotype, silicon concentration, and silicon-related responses. In **Studies in Plant Science** (Vol. 8, pp. 149-158). Elsevier.

Deus, A. C. F., Büll, L. T., CORREA, J., de SOUZA, M. F. T., & VILLAS BÔAS, R. L. (2010). **PRNT de escórias na correção da acidez do solo para o cultivo da alfafa**.

Embrapa. **Socioeconomic and environmental studies**. Acesso em 01/06/21 disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>

Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Centro nacional de pesquisa de solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 421p.

Epstein, E. (1999). Silicon. **Annual review of plant biology**, 50(1), 641-664.

Epstein, E. (2009). Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of applied Biology**, 155(2), 155-160.

Etesami, H., & Jeong, B. R. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and environmental safety**, 147, 881-896.

Exley, C. (2015). A possible mechanism of biological silicification in plants. **Frontiers in Plant Science**, 6, 853.

Fauteux, F., Chain, F., Belzile, F., Menzies, J. G., & Bélanger, R. R. (2006). The protective role of silicon in the Arabidopsis–powdery mildew pathosystem. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 103(46), 17554-17559.

Fawe, A., Menzies, J. G., Chérif, M., & Bélanger, R. R. (2001). Silicon and disease resistance in dicotyledons. In **Studies in plant science** (Vol. 8, pp. 159-169). Elsevier.

Ferreira, Daniel Furtado. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** (UFLA), v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

Filha, M. X., Rodrigues, F. A., Domiciano, G. P., Oliveira, H. V., Silveira, P. R., & Moreira, W. R. (2011). Wheat resistance to leaf blast mediated by silicon. **Australasian Plant Pathology**, 40(1), 28-38.

Fortunato, A. A., Debona, D., Bernardeli, A. M., & Rodrigues, F. A. (2015). Defence-related enzymes in soybean resistance to target spot. **Journal of Phytopathology**, 163(9), 731-742.

Francois, F., Wilfried, R.B., James, G.M., Richard, R.B., 2005. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. **FEMS Microbiology Letters** 249, 1–6.

- Freitas, L. B. D., Coelho, E. M., Maia, S. C. M., & Silva, T. R. B. (2011). Adubação foliar com silício na cultura do milho. **Revista Ceres**, 58, 262-267.
- French-Monar, R. D., Rodrigues, F. A., Korndörfer, G. H., & Datnoff, L. E. (2010). Silicon suppresses Phytophthora blight development on bell pepper. **Journal of Phytopathology**, 158(7-8), 554-560.
- Frew, A., Powell, J. R., Sallam, N., Allsopp, P. G., & Johnson, S. N. (2016). Trade-offs between silicon and phenolic defenses may explain enhanced performance of root herbivores on phenolic-rich plants. **Journal of Chemical Ecology**, 42(8), 768-771.
- Frew, A., Weston, L. A., & Gurr, G. M. (2019). Silicon reduces herbivore performance via different mechanisms, depending on host-plant species. **Austral Ecology**, 44(6), 1092-1097.
- Ghareeb, H., Bozsó, Z., Ott, P. G., Repenning, C., Stahl, F., & Wydra, K. (2011). Transcriptome of silicon-induced resistance against *Ralstonia solanacearum* in the silicon non-accumulator tomato implicates priming effect. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, 75(3), 83-89.
- Giongo, V., & Bohnen, H. (2011). Relação entre alumínio e silício em genótipos de milho resistente e sensível a toxidez de alumínio. **Bioscience Journal**, 27(3), 348-356.
- Governo Do Estado De Minas Gerais. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Parecer Único N° 0388969/2017 (SIAM)**. Belo Horizonte, MG ,11 de abril de 2017. Disponível em:<http://sistemas.meioambiente.mg.gov.br/reunioes/uploads/iYGAYDzfsunXXHYB2F4DA1BHA2OmJtzf.pdf>. Acesso em: 1 Dez. 2021.
- Granulométrica, B. A. (2014). **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**.
- Gunes, A., Pilbeam, D. J., Inal, A., & Coban, S. (2008). Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 39(13-14), 1885-1903.
- Haynes, R. J., & Zhou, Y. F. (2018). Effect of pH and added slag on the extractability of Si in two Si-deficient sugarcane soils. **Chemosphere**, 193, 431-437.
- Heckman, J. (2013). Silicon: a beneficial substance. **Better crops**, 97(4), 14-16.
- Henriet, C., Draye, X., Oppitz, I., Swennen, R., & Delvaux, B. (2006). Effects, distribution and uptake of silicon in banana (*Musa spp.*) under controlled conditions. **Plant and soil**, 287(1), 359-374.
- Huang, H., Xu, L., Bokhtiar, S. M., Manoj, K. S., Li, Y., & Yang, L. (2011). Effect of calcium silicate fertilizer on soil characteristics, sugarcane nutrients and its yield parameters. **Journal of Southern Agriculture**, 42(7), 756-759.
- IBGE. PAM 2020: valor da produção agrícola nacional cresce 30,4% e chega a R\$ 470,5 bilhões, recorde da série 2020. Estatísticas Econômicas. IBGE, **Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção Agrícola Municipal 2020**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de->

noticias/releases/31672-pam-2020-valor-da-producao-agricola-nacional-cresce-30-4-e-chega-a-r-470-5-bilhoes-recorde-da-serie. Acesso em setembro de 2021.

Islam, W., Naveed, H., Zaynab, M., Huang, Z., & Chen, H. Y. (2019). Plant defense against virus diseases; growth hormones in highlights. **Plant signaling & behavior**, 14(6), 1596719.

Issaharou-Matchi, I., Barboni, D., Meunier, J. D., Saadou, M., Dussouillez, P., Contoux, C., & Zirihi-Guede, N. (2016). Intraspecific biogenic silica variations in the grass species *Pennisetum pedicellatum* along an evapotranspiration gradient in South Niger. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, 220, 84-93.

Jeer, M., Telugu, U. M., Voleti, S. R., & Padmakumari, A. P. (2017). Soil application of silicon reduces yellow stem borer, *Scirpophaga incertulas* (Walker) damage in rice. **Journal of Applied Entomology**, 141(3), 189-201.

Jenkins, E., Jamjoum, K., & Al Nuimat, S. (2011). 21 Irrigation and phytolith formation: an experimental study. **Water, life and civilisation: climate, environment and society in the Jordan Valley**, 347.

John, V. M., & Agopyan, V. (2000). Reciclagem de escória de alto-forno no Brasil. **Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais. São Paulo: SEMA-SP/FIESP/CETESB.**

Johnson, S. N., Ryalls, J. M., Barton, C. V., Tjoelker, M. G., Wright, I. J., & Moore, B. D. (2019). Climate warming and plant biomechanical defences: Silicon addition contributes to herbivore suppression in a pasture grass. **Functional Ecology**, 33(4), 587-596.

Kaur, H., & Greger, M. (2019). A review on si uptake and transport system. **Plants**, 8(4), 81.

Korndörfer, G., Snyder, G., Ulloa, M., Perdomo, R., Powell, C., Deren, C., & Datnoff, L. (1999). Soil and plant silicon calibration for rice production. In **Manuscript prepared for the Rice Council Meeting**, Belle Glade (pp. 14-15).

Korndörfer-UFU, Gaspar Henrique e Nolla-UFU, Antonio. **Correção Da Acidez Do Solo Com A Silicatagem**. 2004.

Lee, K. E., Adhikari, A., Kang, S. M., You, Y. H., Joo, G. J., Kim, J. H., ... & Lee, I. J. (2019). Isolation and characterization of the high silicate and phosphate solubilizing novel strain *Enterobacter ludwigii* GAK2 that promotes growth in rice plants. **Agronomy**, 9(3), 144.

Leroy, N., de Tombeur, F., Walgraffe, Y., Cornélis, J. T., & Verheggen, F. J. (2019). Silicon and plant natural defenses against insect pests: Impact on plant volatile organic compounds and cascade effects on multitrophic interactions. **Plants**, 8(11), 444.

Lima, M. D. A., Castro, V. F. D., Vidal, J. B., & Enéas-Filho, J. (2011). Aplicação de silício em milho e feijão-de-corda sob estresse salino. **Revista Ciência Agronômica**, 42, 398-403.

LIMA FILHO, O. F. Silício: produtividade com qualidade na lavoura. **Revista Terra**, Dourados, p. 28 - 29, 2002.

Ma, J. F. (2010). Silicon transporters in higher plants. **MIPs and their role in the exchange of metalloids**, 99-109.

- Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002). **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Elsevier.
- Ma, J. F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in plant science**, 11(8), 392-397.
- Ma, J. F., & Yamaji, N. (2008). Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and molecular life sciences**, 65(19), 3049-3057.
- Ma, J. F., & Yamaji, N. (2015). A cooperative system of silicon transport in plants. **Trends in Plant Science**, 20(7), 435-442.
- Ma, J. F., Miyake, Y., & Takahashi, E. (2001). Silicon as a beneficial element for crop plants. **Studies in plant Science**, 8, 17-39.
- Ma, J. F., Yamaji, N., Mitani, N., Tamai, K., Konishi, S., Fujiwara, T., & Yano, M. (2007). An efflux transporter of silicon in rice. **Nature**, 448(7150), 209-212.
- Massey, F. P., Ennos, A. R., & Hartley, S. E. (2006). Silica in grasses as a defence against insect herbivores: contrasting effects on folivores and a phloem feeder. **Journal of Animal Ecology**, 75(2), 595-603.
- Mauad, M., Grassi Filho, H., Crusciol, C. A. C., & Corrêa, J. C. (2003). Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27, 867-873.
- Mburu, K., Oduor, R., Mgtutu, A., & Tripathi, L. (2016). Silicon application enhances resistance to xanthomonas wilt disease in banana. **Plant Pathology**, 65(5), 807-818.
- Miles, N., Manson, A. D., Rhodes, R., van Antwerpen, R., & Weigel, A. (2014). Extractable silicon in soils of the South African sugar industry and relationships with crop uptake. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 45(22), 2949-2958.
- Mitani, N., Ma, J. F., & Iwashita, T. (2005). Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and cell physiology**, 46(2), 279-283.
- Mitani, N., Yamaji, N., & Ma, J. F. (2009). Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, 50(1), 5-12.
- Montpetit, J., Vivancos, J., Mitani-Ueno, N., Yamaji, N., Rémus-Borel, W., Belzile, F., & Bélanger, R. R. (2012). Cloning, functional characterization and heterologous expression of TaLsi1, a wheat silicon transporter gene. **Plant molecular biology**, 79(1-2), 35-46.
- Najihah, N. I., Hanafi, M. M., Idris, A. S., & Hakim, M. A. (2015). Silicon treatment in oil palms confers resistance to basal stem rot disease caused by *Ganoderma boninense*. **Crop Protection**, 67, 151-159.
- NANAYAKARA, U. N; UDDIN, W.; DATNOFF, L. E. Application of silicon sources increases silicon accumulation in perennial ryegrass turf on two soil types. **Plant and Soil**, The Hague, v. 303, p.83-94, 2008.

- Nascimento, A. D., Feijó, F. M., Albuquerque, A. W., Assunção, I. P., de Andrade Lima, G. S., & Reis, L. S. (2017). Severidade da antracnose do feijão-fava afetada por doses de cálcio e fontes de silício. **Revista Ciência Agrícola**, 15(2), 61-68.
- Ng, L. C., Anuar, S. N. A., Jong, J. W., & Elham, M. S. H. (2016). Phytobeneficial and plant growth-promotion properties of silicon-solubilising rhizobacteria on the growth and control of rice sheath blight disease. **Asian Journal of Plant Sciences**, 15(3/4), 92-100.
- Pereira, H. S., Barbosa, N. C., Carneiro, M. A. C., & Korndörfer, G. H. (2007). Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 42, 239-247.
- Pereira, H. S., Korndörfer, G. H., Moura, W. F., & Corrêa, G. F. (2003). Extratores de silício disponível em escórias e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27(2), 265-274.
- Pohlmann, V., Lazzari, M., Knies, A. E., Fernandes, D. M., & Ludwig, F. (2022). SILÍCIO FOLIAR NA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO NO FEIJÃO. **Revista Ciência Agrícola**, 20(1), 25-32.
- Prado, R. D. M., & Fernandes, F. M. (2001). Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36, 1199-1204.
- Prado, R. D. M., & Fernandes, F. M. (2000). Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. **Scientia Agricola**, 57, 739-744.
- PROFERT - MG. Manual do laboratorista. **Programa interlaboratorial de controle de qualidade de análise de solo**. Emissão dia 6 de julho de 2005.
- Rafi, M. M., & Epstein, E. (1999). Silicon absorption by wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant and Soil**, 211(2), 223-230.
- Rahman, A., Wallis, C. M., & Uddin, W. (2015). Silicon-induced systemic defense responses in perennial ryegrass against infection by *Magnaporthe oryzae*. **Phytopathology**, 105(6), 748-757.
- Raij, B. V., Sacchetto, M. T. D., & Küpper, A. (1968). Estudo de materiais calcários usados como corretivos do solo no Estado de São Paulo. II-Composição química. **Bragantia**, 27(2), 493-500.
- Ramos, L. A., Nolla, A., Korndörfer, G. H., Pereira, H. S., & Camargo, M. S. D. (2006). Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30, 849-857.
- Ratnayake, R. M. R. N. K., Daundasekera, W. A. M., Ariyaratne, H. M., & Ganehenege, M. Y. U. (2016). Some biochemical defense responses enhanced by soluble silicon in bitter gourd-powdery mildew pathosystem. **Australasian Plant Pathology**, 45(4), 425-433.
- Resende, R. S., Rodrigues, F. Á., Costa, R. V., & Silva, D. D. (2013). Silicon and fungicide effects on anthracnose in moderately resistant and susceptible sorghum lines. **Journal of Phytopathology**, 161(1), 11-17.

Ribeiro, A. C., Guimarães, P.T.G, Alvarez, V.H. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa, MG, 1999.

Ryalls, J. M., Moore, B. D., & Johnson, S. N. (2018). Silicon uptake by a pasture grass experiencing simulated grazing is greatest under elevated precipitation. **BMC ecology**, 18(1), 1-8.

Seal, P., Das, P., & Biswas, A. K. (2018). Versatile potentiality of silicon in mitigation of biotic and abiotic stresses in plants: a review. **American Journal of Plant Sciences**, 9(07), 1433.

Silva, D. C. D., Melo, A. S. D., Melo, Y. L., Andrade, W. L. D., Lima, L. M. D., & Santos, A. R. (2020). Silicon foliar application attenuates the effects of water suppression on cowpea cultivars. **Ciência e Agrotecnologia**, 43.

Sommer, M., Kaczorek, D., Kuzyakov, Y., & Breuer, J. (2006). Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 169(3), 310-329.

Song, A., Xue, G., Cui, P., Fan, F., Liu, H., Yin, C., ... & Liang, Y. (2016). The role of silicon in enhancing resistance to bacterial blight of hydroponic-and soil-cultured rice. **Scientific Reports**, 6(1), 1-13.

Sparks A (2022). nasapower: **NASA-POWER Data from R**. doi: 10.5281/zenodo.1040727, R package version 4.0.7, <https://CRAN.R-project.org/package=nasapower>.

Tatagiba, S. D., Rodrigues, F. A., Filippi, M. C. C., Silva, G. B., & Silva, L. C. (2014). Physiological Responses of Rice Plants Supplied with Silicon to *Monographella albescens* Infection. **Journal of Phytopathology**, 162(9), 596-606.

Veloso, C. A. C., Borges, A. L., Muniz, A. S., & Veigas, I. D. J. (1992). Efeito de diferentes materiais no pH do solo. **Scientia Agrícola**, 49, 123-128.

Zanao Junior, L. A., Rodrigues, F. A., Fontes, R. L. F., Korndoerfer, G. H., & Neves, J. C. L. (2009). Rice resistance to brown spot mediated by silicon and its interaction with manganese. **Journal of Phytopathology**, 157(2), 73-78.

Zargar, S. M., Mahajan, R., Bhat, J. A., Nazir, M., & Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. **3 Biotech**, 9(3), 73.

Zhang, A. M., Zhao, G. Y., Gao, T. G., Wang, W., Li, J., Zhang, S. F., & Zhu, B. C. (2013). Solubilization of insoluble potassium and phosphate by *Paenibacillus kribensis* CX-7: a soil microorganism with biological control potential. **African Journal of Microbiology Research**, 7(1), 41-47.