



Foto: Sebastião José de Araújo

COMUNICADO
TÉCNICO

259

Santo Antônio de Goias, GO
Agosto, 2021



Importância do silício para a sustentabilidade da produção de arroz de terras altas no Cerrado brasileiro

Anna Cristina Lanna
Carlos Magri Ferreira
Marta Cristina Corsi De Filippi

Importância do silício para a sustentabilidade da produção de arroz de terras altas no Cerrado brasileiro¹

¹ Anna Cristina Lanna, Química, doutora em Fisiologia Vegetal, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO. Carlos Magri Ferreira, Engenheiro-agrônomo, doutor em Desenvolvimento Sustentável, analista da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO. Marta Cristina Corsi De Filippi, Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Fitopatologia e Microbiologia, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO.

Pesquisa e desenvolvimento de tecnologias agrárias, nas últimas décadas, passaram a ser questionados sobre eficiência para atender às demandas das cadeias produtivas. Simultaneamente, cientistas começaram a priorizar pesquisas e contribuições tecnológicas associadas ao desenvolvimento sustentável. Para Ferreira et al. (2020), resultados de tais pesquisas devem, obrigatoriamente, ser vinculados à sustentabilidade da agropecuária, uma vez que o tema e suas derivações têm forte influência na definição de linhas prioritárias estabelecidas pelas instituições de fomento à pesquisa.

O conceito amplo de sustentabilidade fundamentado no tripé da sustentabilidade: economia, sociedade e ambiente (do inglês, *triple bottom*) é bastante conhecido. No entanto, ainda há fragilidades na associação causa, efeito, intensidade e até mesmo a direção do impacto, positivo ou negativo, das práticas e recomendações realizadas pela pesquisa (Ferreira, 2008). Para não incorrer nessa imprecisão técnica, este trabalho apresenta vasta revisão

bibliográfica sobre a importância do uso do silício (Si) nos campos de produção de arroz de terras altas, pois o elemento propicia às plantas maior tolerância à salinidade e à deficiência hídrica; reduz a absorção de elementos tóxicos e a taxa transpiratória foliar; além de aumentar a disponibilidade de nutrientes essenciais e a resistência mecânica à penetração de patógenos e herbívoros (Guo-Chao et al., 2018).

O arroz é alimento básico de 84% da população brasileira e de mais de 30% da população mundial (Carvalho et al., 2020). De acordo com Kikuta et al. (2016), o arroz de terras altas representa 4% da área de produção de arroz mundial, respondendo por menos de 9% da área cultivada na Ásia, 46% na América Latina, incluindo os países do Caribe, e 47% na África Ocidental. Na África, o arroz de terras altas responde por 84% da área total da África Subsaariana (Singh et al., 2014) e, no Brasil, a maior parte das lavouras está localizada no bioma Cerrado, concentrando-se principalmente nas regiões Centro-Oeste, incluindo os estados de Mato Grosso e Goiás;

Norte, Tocantins, Roraima e Pará; e Nordeste, Maranhão (Guimarães et al., 2006; Oliveira Neto, 2015).

Nos últimos anos, o arroz de terras altas teve baixa participação na produção total de arroz no Brasil. Não obstante, o País é o maior produtor de arroz de terras altas do mundo, dispondo de tecnologias e inovações à disposição dos produtores. A expansão do cultivo do arroz de terras altas favorece a distribuição estratégica para o abastecimento interno, proporcionando o acesso, principalmente, à população com menor poder aquisitivo, gerando impactos positivos nos aspectos econômico, social e ambiental. Além disso, tem potencial para atender o aumento da demanda mundial pelo alimento (Carvalho et al., 2020).

Nutrientes essenciais e benéficos às plantas

O solo é um reservatório vivo de minerais necessários às plantas, com o sistema radicular absorvendo os elementos essenciais, benéficos e tóxicos, sem discriminação, contidos na solução do solo (Faquin, 2005). Para Arnon e Stout (1939), Malavolta (1980) e Epstein (1999), os elementos minerais essenciais são definidos como nutrientes minerais, sem os quais a planta não vive; benéficos, aqueles que não são essenciais, uma vez que a planta pode viver sem eles, mas a presença é capaz de contribuir de alguma forma para o crescimento e produção da planta; e tóxicos, os quais, essenciais

ou não, são prejudiciais à planta, pois um elemento mineral é potencialmente tóxico, dependendo da concentração no meio.

Além dos elementos considerados minerais por serem obtidos primariamente da água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2), carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H), outros quatorze minerais são considerados essenciais para o desenvolvimento das plantas, sendo esses divididos por aspectos puramente quantitativos em dois grupos: 1) macronutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S); 2) micronutrientes: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn) (Dechen; Nachtigall, 2007). Uma vez incorporados aos tecidos das plantas, nutrientes minerais essenciais tornam-se componentes/ativadores de enzimas, ou reguladores da intensidade de hidratação do protoplasma e, por extensão, da atividade biológica de proteínas. Quando o suprimento desses nutrientes é inadequado, desenvolvem-se desordens fisiológicas manifestadas por sintomas característicos de deficiência (ou toxidez), que dependem das funções dos nutrientes e de sua capacidade de translocação no floema. Cada um dos macronutrientes e micronutrientes exerce pelo menos uma função dentro do vegetal e a deficiência ou excesso provocam sintomas de carência, ou de toxidez, característicos.

Alguns elementos não são essenciais, mas apresentam efeitos benéficos no desenvolvimento de certas plantas,

a exemplo do sódio (Na) para espécies como espinafre (*Spinacea oleracea*), beterraba (*Beta vulgaris*) e algodão (*Gossypium hirsutum*); alumínio (Al) para algumas gramíneas e plantas de chá (*Camellia sinensis*); cobalto (Co) para leguminosas (*Fabaceae*), selênio (Se) para ervilhaca de leite (*Astragalus* sp.) e tremoço-branco (*Lupinus albus*); vanádio (V) para alface (*Lactuca sativa*) e tomateiro (*Lycopersicon esculentum*); e silício (Si) para gramíneas como arroz (*Oryza sativa*), trigo (*Triticum aestivum*), aveia (*Avena sativa*) e cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) (Epstein, 1994; Korndörfer et al., 2002; Faquin, 2005; Liang et al., 2015). No arroz, níveis de Si podem exceder outros nutrientes minerais, incluindo o N (Epstein; Blomm, 2006).

A utilização do Si no Brasil tem sido difundida após a inclusão como micronutriente na legislação de fertilizantes, pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) (Brasil, 2004). O Si solúvel foi regulamentado pelo Decreto n° 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que trata da inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura, e pela Instrução Normativa n° 5, de 23 de fevereiro de 2007, que o considera um micronutriente (Brasil, 2007).

O Si é um metaloide tetravalente, sendo elemento mais abundante da superfície da Terra, compreendendo, aproximadamente, 28% da crosta terrestre (Epstein, 1994), encontrado na

natureza na forma de óxido de silício (SiO_2), mineral primário mais abundante, constituindo a base estrutural das rochas e da maioria dos argilominerais. Devido ao processo de dessilicificação que ocorreu durante a intemperização dos solos, o Si é encontrado, predominantemente, na forma de quartzo, opala ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) e como aluminossilicatos cristalinos insolúveis, não disponíveis às plantas (Barbosa Filho et al., 2001; Richmond; Sussman, 2003; Liang et al., 2015).

A forma solúvel de Si na solução do solo, que pode ser absorvida pelas raízes das plantas, é o ácido monossilícico (H_4SiO_4), o qual ocorre como molécula monomérica não carregada numa ampla faixa de pH que varia de 2 a 9 (Epstein, 2001; Knight; Kinrade, 2001). A concentração de Si extraível nos solos varia desde menos de 1 mg dm^{-3} a mais de 100 mg dm^{-3} (Raven, 1983) em função dos teores de argila (Raij; Camargo, 1973), dos teores de óxidos de ferro e alumínio (Freitas et al., 1977) e do pH (Beckwith; Reeve, 1963). Dentre esses fatores, o pH é importante, pois pode ser alterado com o manejo dos solos, enquanto os outros são intrínsecos. De acordo com Ayres (1966) e Cheong e Halais (1970), existem diferenças significativas de Si disponível entre os solos; com ênfase na deficiência comprovada de Si em solos ácidos, altamente intemperizados, em áreas tropicais e subtropicais. Áreas do Brasil Central indicaram teores de Si disponível em ácido acético 0,5 M variando entre $8,8 \text{ mg L}^{-1}$ e $66,4 \text{ mg L}^{-1}$. Como essa faixa de variação é larga, é possível que em alguma área ocorra deficiência de Si

e, portanto, espera-se que culturas exigentes em Si, como o arroz, respondam à aplicação de fertilizantes silicatados (Barbosa Filho et al., 2001).

Conforme mencionado, o Si é absorvido pelas plantas na forma de ácido monossilícico não dissociado (Carlisle et al., 1977) e translocado da mesma forma através do xilema (Casey et al., 2004). Os mecanismos de absorção de Si pelas raízes das plantas divergem entre as espécies (Guo-Chao et al., 2018) para a maioria das monocotiledôneas, como arroz (*Oryza sativa*) (Takahashi et al., 1990), trigo (*Triticum aestivum*) (Jarvis, 1987; Rains et al., 2006), avevém (*Lolium perenne*) (Nanayakkara et al., 2008), cevada (*Hordeum vulgare*) (Nikolic et al., 2007), milho (*Zea mays*) (Liang et al., 2006a) e banana (*Musa* spp) (Henriet et al., 2006), como também para plantas ciperáceas e poucas dicotiledôneas tais como pepino (*Cucumis sativus*) (Liang et al., 2005a; Nikolic et al., 2007), girassol (*Helianthus annuus*) e abóbora-d'água (*Benincasa hispida*) (Liang et al., 2006a), nas quais o Si é absorvido de forma ativa, ao contrário da maioria das dicotiledôneas que absorvem o Si passivamente (Takahashi et al., 1990). Por outro lado, dicotiledôneas como o feijão-fava (*Vicia faba*) excluem o Si de suas raízes (Takahashi et al., 1990; Liang et al., 2005a; Nikolic et al., 2007). Em plantas acumuladoras, componentes ativo e passivo da maquinaria de absorção de Si coexistem nas raízes, com sua contribuição relativa sendo dependente

da espécie vegetal e da concentração externa do Si (Liang et al., 2006b).

Em estudos moleculares sobre a absorção e transporte do Si, um grande grupo de proteínas e genes com características distintas foi considerado responsável pelo transporte desse elemento químico da solução do solo para a raiz e da raiz para a parte aérea, em diferentes espécies de plantas (Ma; Yamaji, 2015). As espécies e tecidos que apresentam diferentes teores de Si explicam-se, ao menos parcialmente, pelas diferenças na existência, densidade e localização do complexo sistema proteico de transporte do Si (Guo-Chao et al., 2018). No entanto, uma variação genotípica da concentração de Si na parte aérea foi encontrada, tanto dentro como entre as espécies vegetais, embora a variação dentro seja geralmente muito menor (Deren, 2001; Broadley et al., 2011). Estudos filogenéticos mostraram que a diferença de existência, densidade e localização de proteínas relacionadas ao transporte do Si é responsável pelas distintas capacidades de acúmulo do elemento no reino vegetal (Guo-Chao et al., 2018).

Nos tecidos das plantas, o Si é frequentemente encontrado como complexo Si-moléculas orgânicas, tais como polissacarídeos, lignina e proteínas (Carlisle et al., 1977; Perry; Lu, 1992), o qual impregna nas paredes celulares da epiderme e vasos condutores (Kaufman et al., 1969). A maioria do Si está presente em plantas na forma de fitólitos (corpos silicosos) dificilmente dissolvidos (Prychid et al., 2003b).

Todas as plantas terrestres contêm Si em seus tecidos, embora o conteúdo varie consideravelmente com a espécie, entre 0,1% e 10%, em base de massa seca (Liang et al., 2015). A capacidade das plantas em acumular Si nos tecidos varia grandemente e, por isso, podem ser divididas em acumuladoras e não acumuladoras (Tubana et al., 2016). Em geral, espécies comumente pertencentes às gramíneas (*Poaceae*), como arroz (*Oryza sativa*) e trigo (*Triticum aestivum*), são consideradas acumuladoras de Si (teor foliar de 10 g kg⁻¹ de Si), com processo ativo de absorção pelas raízes, enquanto as espécies comumente pertencentes às leguminosas (*Fabaceae*), como feijão (*Phaseolus vulgaris*) e soja (*Glycine Max*), são consideradas não acumuladoras (teor não ultrapassa 5 g k⁻¹ de Si) e apresentam absorção radicular do elemento de forma passiva. A distribuição do Si na planta depende muito da espécie, sendo uniforme em plantas que acumulam pouco e noutras há maior proporção nas raízes e, em plantas acumuladoras, cerca de 90% estão na parte aérea.

Silício e os benefícios à planta de arroz

O arroz é uma espécie acumuladora de Si (10% em massa seca da parte aérea), na qual o alto teor demonstrou ser necessário para o crescimento saudável e produção elevada e estável. O uso do Si na cultura do arroz promove aumento de produtividade, perfilhamento, número de folhas, massa seca de plantas, número de espiguetas por panícula, adequadas

formação e qualidade da casca dos grãos, maior qualidade das sementes e altura de plantas, funcionando também como barreira física que, não só aumenta a resistência e a rigidez dos tecidos, mas também previne a perda excessiva de água devido à redução da transpiração cuticular e estomática, proporcionando economia de água; interfere na arquitetura da planta, tornando as folhas mais eretas e, possivelmente, melhorando a interceptação de luz para maior eficiência do processo fotossintético, evitando o acamamento quando aplicadas altas doses de nitrogênio; auxilia na disponibilidade de nutrientes, especialmente de P em solos com deficiência; reduz a toxicidade por metais pesados e aumenta a resistência mecânica à penetração de patógenos e herbívoros (Adams, 1980; Kúpfer; Kahnt, 1992; Korndörfer et al., 1999; Barbosa Filho et al., 2001; Fawe et al., 2001; Lux et al., 2002; Gong et al., 2003; Ma, 2004; Melo, 2005; Ma; Yamaji, 2006; Liang et al., 2007; Tokura et al., 2007; Guntzer et al., 2012; Van Bockhaven et al., 2013; Hernandez-Apaolaza, 2014; Zhu; Gong, 2014; Adrees et al., 2015; Pontigo et al., 2015; Coskun et al., 2016).

Por outro lado, sabe-se que, quando o teor de Si é insuficiente, o arroz apresenta crescimento vegetativo e rendimento de grãos reduzidos, em virtude de necrose em folhas maduras e murchamento das plantas (Okuda; Takahashi, 1965). Mutantes de arroz deficientes na absorção de Si também mostraram limitação de crescimento em comparação com o tipo selvagem, quando cultivados na mesma condição (Ma et al., 2006, 2007).

Por essa razão, a aplicação de fertilizante silicatado em áreas de cultivo, especialmente àquelas com baixo teor de Si, é uma prática agrícola bastante comum em muitos países, tais como China, Japão, Coreia, Brasil e EUA, para alta produtividade e produção sustentável (Ayres, 1966; Ma; Takahashi, 2002; Liang et al., 2015; Guo-Chao et al., 2018). A aplicação em campo (larga escala) de fertilizantes silicatados foi documentada na década de 1950, no Japão, e na década de 1960, na Coreia do Sul (Park, 2001; Ma; Takahashi, 2002). A fertilização com Si também é uma prática agrícola muito comum em países como Tailândia, Filipinas, Ceilão, Vietnã, Sri Lanka e Índia, bem como na América do Sul, América do Norte e América Central (Datnoff et al., 1992; Liang et al., 1994, 2015; Savant et al., 1996; Alvarez; Datnoff, 2001). Em um artigo de revisão de Wang et al. (2001), a aplicação de fertilizante silicatado, em campo, aumentou a produção de arroz em até quatro vezes em 16 províncias da China, entre 1979 e 1999, com incremento médio da produção de 10%. Os resultados de 50 experimentos de campo realizados no Nordeste da China mostraram que a adição de fertilizante à base de Si (escória de siderurgia) aumentou a produção de arroz em 3,5% a 28,5% em campos de arroz cultivado nos mais diferentes solos (Liang et al., 2015).

Além do arroz, muitas outras espécies vegetais de importância agrícola e hortícola, incluindo cevada (*Hordeum vulgare*), milho (*Zea mays*), milheto (*Pennisetum glaucum*), sorgo (*Sorghum bicolor*), algodão (*Gossypium hirsutum*), tomate

(*Solanum lycopersicum*), batata (*Solanum tuberosum*) e tomate cereja (*Lycopersicon esculentum*) podem se beneficiar dos fertilizantes à base de Si, em termos de crescimento das plantas e maior rendimento de grãos (Wang et al., 2001; Stamatakis et al., 2003; Toresano-Sanchez et al., 2012; Chagas et al., 2016; Vulavala et al., 2016). Adicionalmente, pesquisas mais recentes concentram-se no uso de Si em diferentes sistemas agrícolas, com objetivos distintos, como a produção de biocombustíveis e a alimentação animal (Zhang et al., 2015; Smith et al., 2016).

Em estudos moleculares, Guo-Chao et al. (2018) relataram que, em arroz, *OsLsi1* foi o primeiro gene identificado em plantas superiores responsáveis pelo influxo de Si da solução do solo para as células radiculares usando arroz mutante (*lsi1*), deficiente na absorção ativa de Si (Ma et al., 2006). Em anos consecutivos, *OsLsi2* foi descoberto como o primeiro gene que codifica o transportador de efluxo de Si, o qual foi também clonado usando um novo mutante [*lsi2*] (Ma et al., 2007). Além do arroz, *Lsi1* e *Lsi2* também foram identificados em cevada [*HvLsi1*, *HvLsi2*] (Chiba et al., 2009; Mitani et al., 2009a), trigo [*TaLsi1*] (Montpetit et al., 2012), abóbora (*Cucurbita moschata*) [*CmLsi1*] (Mitani et al., 2011), soja (*Glycine max*) [*GmNIP2-1*, *GmNIP2-2*] (Deshmukh et al., 2013), pepino [*CSiT1*, *CSiT2*, *CsLsi1*] (Wang et al., 2015a; Sun et al., 2017), cavalinha [*EaNIP3-1*, *EaNIP3-3*, *EaNIP3-4*, *EaLsi2-1*, *EaLsi2-2*] (Gregoire et al., 2012; Vivancos et al., 2016) e milho [*ZmLsi1*, *ZmLsi2*] (Mitani et al., 2009a; 2009b) (Figura 1).

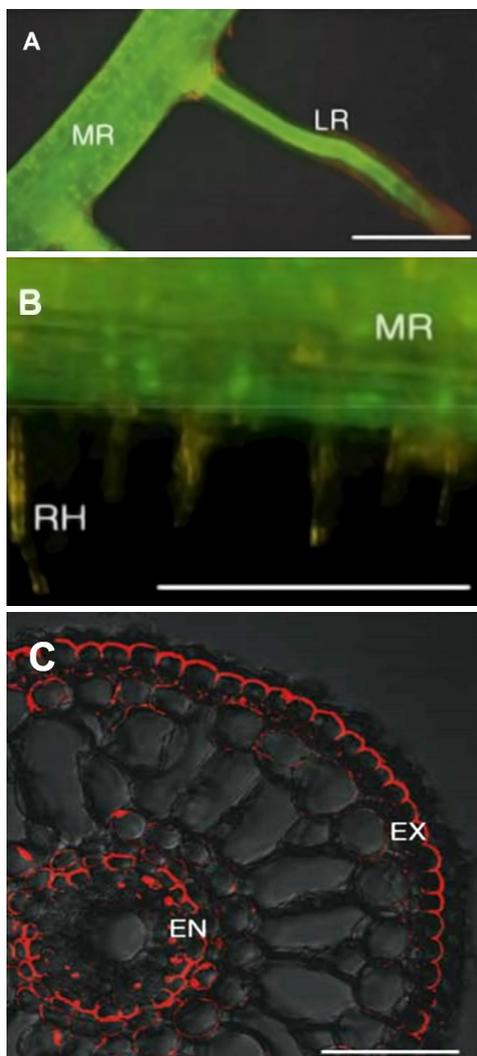


Figura 1. Controle da absorção de Si pelo gene *Lsi1* em plantas de milho: localização de *Lsi1* nas raízes de milho: raiz principal (MR), raiz lateral (LR), radicular (RH), barra = 500 mm (A e B); localização subcelular de *Lsi1*, com corte transversal corado com anticorpos de *Lsi1*: endoderme (EN) e exoderme (EX), barra = 50 mm (C).

Fonte: Ma e Yamaji (2006).

O arroz absorve Si da solução do solo por meio do transportador *Lsi1*, do lado distal, e libera no apoplasto do aerênquima, mediante o transportador *Lsi2*, do lado proximal, das células exodérmicas (Guo-Chao et al., 2018). Na sequência, o Si é transportado para o estelo através de ambos, *Lsi1* e *Lsi2*, localizados na camada celular endodérmica, e então, translocado para a parte aérea pelo fluxo transpiratório através do xilema. Mais de 90% do Si absorvido pela raiz é translocado para a parte aérea (Ma; Takahashi, 2002), embora certa quantidade possa ser depositada na parede celular dos vasos condutores da raiz (Balasta et al., 1989), o que pode impedir a compressão de vasos quando as taxas de transpiração são altas (Raven, 1983). A concentração de Si na seiva do xilema das espécies de plantas acumuladoras pode ser várias vezes maior que a concentração crítica para polimerização do ácido monossilícico *in vitro*; no entanto, essas concentrações extremamente altas estão presentes transitoriamente, sem tendência à polimerização. De acordo com Mitani e Ma (2005) e Mitani et al. (2005), a concentração de Si no xilema mostra alta correlação com a capacidade de acumulação em diferentes espécies de plantas.

Finalmente, antes de ser depositado na parede celular da epiderme, e nas células específicas, o Si deve ser transportado para fora do xilema por um transportador *Lsi6* específico (Figura 2). Essa proteína é responsável pelo transporte do ácido silícico do xilema para as células do parênquima do xilema (descarregamento do xilema), influenciando a subsequente

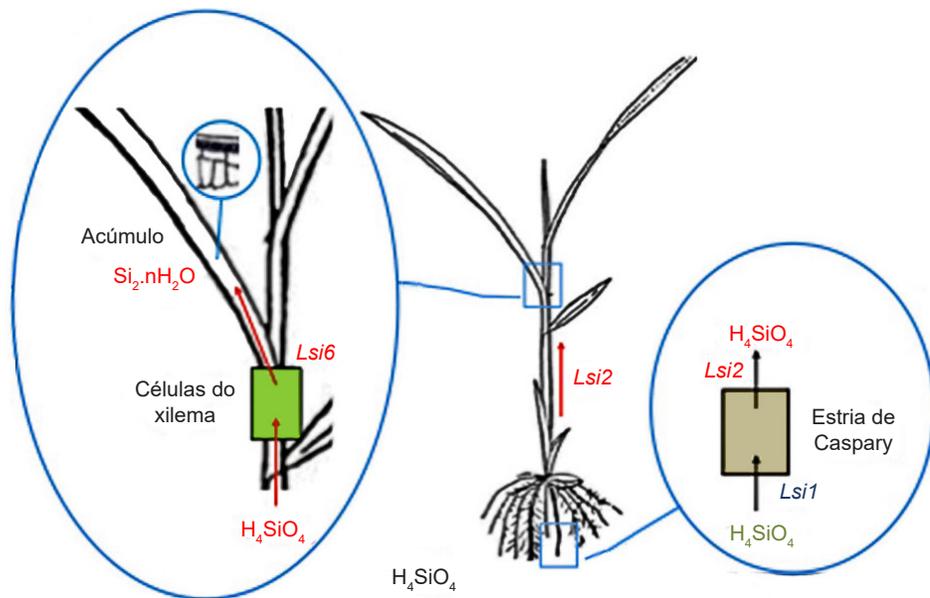


Figura 2. Localização dos genes *Lsi1*, *Lsi2* e *Lsi6*, responsáveis pela absorção e transporte do ácido monossilícico do solo para a epiderme das folhas de arroz .

Fonte: Ma et al. (2006), adaptado por Souza (2018).

distribuição e deposição de Si na parte aérea. O gene que codifica o transportador *Lsi6* foi caracterizado em arroz (*OsLsi6*) (Yamaji et al., 2008), cevada (*HvLsi6*) (Yamaji et al., 2012) e milho (*ZmLsi6*) (Mitani et al., 2009a). Assim como *OsLsi6*, *ZmLsi6* e *HvLsi6* também se expressam nas raízes e na parte aérea, mostrando localização polar nas células do parênquima do xilema adjacentes aos vasos nas bainhas e nas lâminas foliares (Mitani et al., 2009b; Yamaji et al., 2012). Depois de translocado para a parte aérea, o ácido monossilícico é mais concentrado através da perda de água derivada do processo de transpiração e, em seguida, polimerizado em sílica amorfa ($(SiO_2)_n \cdot nH_2O$), conhecida como opala, sem gasto energético, em concentrações superiores a 2 mmol L^{-1}

(Mitani et al., 2005; Ma; Yamaji, 2006). A sílica amorfa parece ser praticamente a única forma de Si acumulada, principalmente na parede celular de folhas e colmos (Prychid et al., 2003a; Ma; Yamaji, 2006). Em menor grau, também pode ser depositado na parede celular das células da endoderme da raiz (Lux et al., 2003) e dos tubérculos (Chandler-Ezell et al., 2006). Na parede celular da epiderme foliar, um polímero amorfo-hidratado (opala) pode formar camadas duplas de cutícula e sílica, e pode ser também depositado em células silicificadas específicas (Ma; Takahashi, 2002; Prychid et al., 2003a). Nas folhas de espécies acumuladoras de Si, como arroz, trigo e bambu, os fitólitos são encontrados em células específicas, denominadas células de sílica, localizadas

em feixes vasculares e/ou presentes como corpos de sílica em células buliformes, células fusóides ou espinhos (Guntzer et al., 2010). As proporções e a localização dos fitólitos variam não apenas conforme as espécies, mas com a idade da planta (Sangster et al., 2001). A deposição de Si nas camadas celulares do tecido epidérmico de folhas e colmos contribui para a rigidez da parede celular e reforço mecânico dos tecidos, transcendendo o aumento da elasticidade da parede celular primária, por interagir com pectinas e polifenóis através de ligações cruzadas, durante o crescimento em extensão da parede celular (Faquin, 2005) e promovendo resistência à infecção por patógenos (fungos, bactérias, vírus) na superfície foliar.

O papel do silício como indutor de tolerância aos estresses abióticos em arroz

A carência de terras agricultáveis é um tema extremamente crítico e atual devido ao crescimento populacional mundial, tornando-se crucial aumentar a produção de alimentos sem usar solos inadequados, tais como os de alta salinidade, pobres em disponibilidade de nutrientes, com baixa capacidade de retenção de água e com níveis variáveis de poluição. Solos de menor qualidade produzem impactos negativos nas plantas, resultando em menor produção de alimentos (Greger et al., 2018). Para viabilizar o uso desse tipo de solo, a aplicação de fertilizantes silicatados tem

sido amplamente discutida, uma vez que o Si torna as plantas mais resistentes aos estresses abióticos como salinidade, deficiência hídrica, radiação UV, metais pesados e deficiência nutricional, especialmente de P.

Estresse químico

a) Salinidade

O estresse salino nas plantas induz ao estresse osmótico e/ou à toxicidade iônica. Altas concentrações de sal em solução resultam em estresse osmótico, que limita a disponibilidade de água nas plantas e afeta o equilíbrio hídrico. A toxicidade iônica é o resultado do acúmulo, em concentrações tóxicas, de sal nas folhas, o que acelera a senescência e leva a planta à morte (Munns; Tester, 2008). Um dos elementos que aliviam as plantas do estresse salino é o Si e o efeito benéfico tem sido observado em arroz (Matoh et al, 1986; Gong et al., 2006), trigo (Ahmad et al., 1992), tomate (Romero-Aranda et al., 2006), e pepino (Wang et al., 2015b), dentre outras espécies. Esse efeito pode ser atribuído à redução da taxa transpiratória, em que ocorre o bloqueio parcial do influxo de Na^+ e, portanto, mantém a homeostase iônica no interior da célula; à deposição de Si nas raízes, onde reduz a absorção de Na^+ por reduzir o fluxo (Matoh et al., 1986; Gong et al., 2006; Yin et al., 2016); ao aumento do conteúdo de água na folha (Romero-Aranda et al., 2006); e à atividade do sistema antioxidativo (Zhu et al., 2004) e da H^+ -ATPase da membrana plasmática

(Liang et al., 2006b). Yin et al. (2016) relataram que o Si reduziu a captação e o acúmulo de Na^+ através da mediação de alguns processos metabólicos importantes relacionados à regulação de canais iônicos, mostrando, pela primeira vez, que o metabolismo de poliaminas participa dessa regulação.

b) Elementos tóxicos

É atribuído ao Si um aumento da tolerância das plantas à toxidez de Mn e Fe em arroz irrigado (Okuda; Takahashi, 1962) e cevada (Williams; Vlamis, 1957; Horiguchi; Morita, 2008), Cádmio (Cd) e Arsênio (As) nas partes comestíveis de plantas de batata, cenoura, cebola e trigo (Greger; Landberg, 2015) e Cd em plantas de morango (Treder; Cieslinski, 2005). Os mecanismos fisiológicos da ocorrência desse efeito, variam desde o estímulo do sistema antioxidativo, complexação de íons metálicos, imobilização dos metais durante o crescimento vegetal, até a compartimentação em vacúolos, citoplasma ou parede celular (Liang et al., 2007). Por outro lado, o Si atua no próprio solo, uma vez que a aplicação de silicatos nos solos propicia a formação de frações insolúveis dos elementos tóxicos, estabilizando-os e reduzindo a biodisponibilidade. No solo, isso pode ocorrer por precipitação, reações de redução e adsorção e por retenção dos metais em alocação nas frações de matéria orgânica e óxido de ferro (Dietzel, 2000; Matichenkov; Bocharnikova, 2001; Neumann; Nieden, 2001; Sommer et al., 2006; Cunha et al., 2008). Outrossim, como os ânions silicatos aumentam o

pH do solo, a atividade dos elementos tóxicos se reduz devido à precipitação em compostos insolúveis, levando à polimerização dos silicatos ligados a esses elementos (Dietzel, 2000; Sommer et al., 2006).

c) Deficiência nutricional

Outro efeito benéfico do Si é a interação com o P presente no solo, relacionada à competição do elemento pelos mesmos sítios de adsorção de P na fração mineral. O H_4SiO_4 sofre adsorção por óxidos de Al, Fe e Mn, semelhantemente ao que ocorre com o fosfato (PO_4^{3-}), o que é um efeito benéfico do Si, visto que a sua adição eleva a disponibilidade de P na solução do solo, o qual pode ser absorvido pelas plantas (Brait, 2008).

Pozza et al. (2007) avaliaram a sorção e a dessorção competitiva entre diferentes ânions em gibbsita de um Gleissolo e encontraram a sequência de adsorção a 30% da capacidade máxima: fosfato>silicato>sulfato>>>nitrato. Em ensaio de competição entre silicato e fosfato, os autores observaram a capacidade do P em deslocar o Si previamente adsorvido e vice-versa, além de constatarem que a aplicação de P posteriormente à de Si pode reduzir até 41% da adsorção de P e, conseqüentemente, a disponibilidade do nutriente pode ser aumentada. O sinergismo de todos esses fatores contribui para aumentar a disponibilidade de P no solo, aumentar a eficiência dos fertilizantes fosfatados e propiciar melhor desenvolvimento de plantas (Borges, 2018). Greger et al.

(2018) observaram que vários tipos de solos, tratados com Si em alta dosagem (1.000 kg ha⁻¹ Si) aumentaram a disponibilidade de P (10%-40%), S (0%-51%), Ca (0%-33%), Cu (10%-40%), Mo (0%-54%), Mn (9%-41%), Zn (3%-90%), Fe (≈10%) e Cl (0%-15%).

Estresse hídrico

A seca é um dos estresses abióticos mais críticos e comuns durante o cultivo do arroz de terras altas porque impacta negativamente diversas características fisiológicas, as quais são consideradas cruciais para o ótimo crescimento e desenvolvimento das plantas (Farooq et al., 2009; Yao et al., 2009). Estudos mostram que o Si desempenha função que estimula tanto a formação de barreira física (ou mecânica), uma vez que o Si é depositado junto da cutícula e forma uma dupla camada de sílica e cutícula, quanto processos fisiológicos: a) altera os níveis de osmólitos e enzimas antioxidantes, que são a primeira linha de defesa do estresse por deficiência hídrica (Sapre; Vakharia, 2016); e b) aumenta a eficiência do uso da água, uma vez que reduz a taxa transpiratória foliar (Zuccarini, 2008). O complexo Si-moléculas orgânicas, localizado nas membranas celulares do tecido epidérmico, protege as plantas contra a perda excessiva de água, devido, principalmente, à redução do diâmetro dos poros estomáticos (Meena et al., 2014). Depósitos de Si nas paredes celulares dos vasos do xilema evitam a compressão dos vasos em condições de alta transpiração, causada por seca

ou estresse por calor (Sapre; Vakharia, 2016). Assim, na busca por tecnologias para mitigar os efeitos da seca nas plantas, a fertilização silicatada se mostra promissora (Zanetti et al., 2016).

Estresse luminoso

Os efeitos danosos da radiação UVB nas plantas incluem inibição da fotossíntese, reduções da altura, do número e do tamanho das folhas, das raízes e da biomassa total (Yao; Liu, 2006, Kataria et al., 2014). Observa-se ainda oxidação de proteínas, desestabilização de membranas, alteração nos mecanismos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos (Tripathi et al., 2017), enrolamento foliar, degradação de pigmentos fotosintéticos, clorose e necrose dos tecidos (Jansen et al., 1998; Ravindran et al., 2010; Lidon; Ramalho, 2011; Inostroza-Blancheteau et al., 2014). Dentre as alterações estruturais induzidas pela radiação UVB, incluem-se o aumento da espessura da epiderme adaxial, do parênquima paliçádico e esponjoso, e do limbo como um todo (Torres Boeger; Poulson, 2006; Verdaguer et al., 2012), além de alterações na densidade de estômatos (Kakani et al., 2003; Gitz et al., 2005). De acordo com Chen et al. (2016), o Si reduz o dano do estresse UVB nas plantas porque aumenta a concentração de compostos absorvedores de UVB, principalmente compostos fenólicos; fortalece a capacidade antioxidante, representada por níveis mais elevados dessas moléculas não enzimáticas; e aumenta a expressão de genes relacionados ao fotorreparo.

O papel do silício como supressor da brusone em arroz de terras altas

Embora a essencialidade do Si para a planta ainda não tenha sido comprovada, efeitos benéficos às plantas desafiadas com insetos-praga e doenças, têm sido relatados (Ma, 2004; Liang et al., 2007; Guntzer et al., 2012; Van Bockhaven et al., 2013; Hernandez-Apaolaza, 2014; Zhu; Gong, 2014; Adrees et al., 2015; Pontigo et al., 2015; Coskun et al., 2016; Wang et al., 2017).

O conhecimento disponível sobre o Si nos mecanismos de resistência das plantas de arroz à brusone (*Pyricularia oryzae*) tem sido utilizado como base para pesquisas sobre outros patógenos. Estudos que se iniciaram no Japão (Suzuki, 1965) e se estenderam pelas décadas de 1970, 1980 e 1990 do século 20, continuando no século 21, sobre a natureza da resistência das plantas à brusone e demais doenças do arroz, referentes ao Si, contribuíram e contribuem substancialmente para entendimento do mecanismo, formulando, resumidamente, os seguintes conceitos:

1) O Si depositado como sílica amorfa na epiderme foliar impede e/ou retarda a penetração do patógeno através da formação de uma barreira mecânica (Rodrigues; Datnoff, 2005; Santos et al., 2009). Como exemplo, cita-se o efeito do Si na interação arroz x *Magnaporthe oryzae*, no qual a penetração do fungo pode ser evitada, reduzindo o número de pontos de infecções e, conseqüentemente, as lesões

não se desenvolvem ou são retardadas, aumentando os períodos de incubação e de latência, diminuindo o tamanho da lesão (Figura 3) (Rodrigues et al., 2005; Abed-Ashtiani et al., 2012; Souza et al., 2015).

2) Os teores de Si na planta e no solo relacionam-se positivamente com a resistência genética e a idade da planta. Nos tecidos da planta, os teores mostram-se maiores em cultivares geneticamente resistentes, aumentando também em plantas de arroz com idade fisiológica mais avançada. De acordo com Datnoff et al. (1991) e Prabhu et al. (2001), o grau de resistência de cultivares de arroz suscetíveis aumenta com a aplicação de fertilização silicatada.

3) Os teores de Si na planta relacionam-se negativamente com o teor de N e o sombreamento e, conseqüentemente, com a resistência às doenças. No entanto, ainda é desconhecido se a aplicação de Si afeta a absorção/assimilação de N (Winslow, 1992).

4) O Si atua como modulador da atividade de enzimas e proteínas relacionadas à defesa da planta, β -1,3-glucanase, peroxidase, fenil amônia-liase, PR-proteínas e fitoalexinas, além de compostos fenólicos, lignina e ácido salicílico, substâncias responsáveis pela defesa das plantas (Rodrigues et al., 2005; Datnoff, 2010; Cruz et al., 2013). Em estudo realizado por Souza et al. (2015) em plantas de arroz de terras altas, cultivar BRS Primavera, o Si reduziu a brusone das folhas em 96% (Figura 3) e aumentou a atividade de

quitinase (CHI), β 1,3-glucanase (GLU), peroxidase (POX) e fenilalanina amônia-liase (PAL), bem como o teor de ácido salicílico (SA).

5) A absorção e os benefícios do Si podem ser potencializados com a aplicação de microrganismos multifuncionais como *Trichoderma asperellum*, *Burkholderia pyrrocinia* e *Pseudomonas fluorescens*, tanto no controle de doenças como no incremento de processos fisiológicos, tais como acúmulo de fitomassa da parte aérea e da raiz, trocas gasosas, pigmentos cloroplastídicos, açúcares solúveis totais e eficiência do uso da água (Sousa et al., 2018).

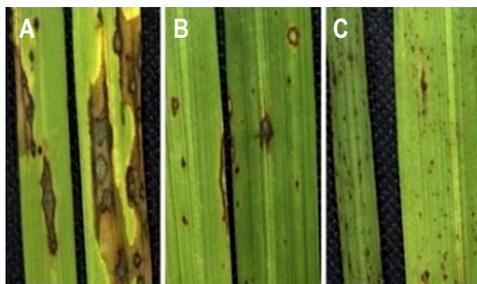


Figura 3. Severidade da brusone foliar em folhas de arroz: plantas inoculadas com *M. Oryzae* (A); plantas fertilizadas com Si e inoculadas com *M. Oryzae* (B); plantas fertilizadas com Si e microrganismos multifuncionais (C).

Fonte: Souza et al. (2015).

Fontes comerciais de silício

Como abordado anteriormente, a concentração de Si disponível varia significativamente entre os diferentes

solos, podendo ser um dos principais fatores que limitam a produção agrícola em determinadas regiões. Para remediar a deficiência de Si e promover a produção agrícola, várias fontes são utilizadas como fertilizante, incluindo silicato à base de escória (subprodutos metalúrgicos), silicato de potássio ou sódio solúvel, silicato de potássio de liberação lenta, fabricado a partir de feldspato, silicato de cálcio (Wollastonita e Silício Forte), silicato de cálcio e magnésio (Agrosilício), ácido monossilícico, AgroSiCa (subprodutos da produção de fósforo elementar) e Sifol (silício foliar) (Liang et al., 2015; Borges, 2018; Guo-Chao et al., 2018).

As escórias siderúrgicas são fontes de Si mais baratas e abundantes de silicatos (Korndörfer et al., 2003). A origem das escórias de siderurgia de ferro e aço se dá na reação a altas temperaturas do calcário (CaCO_3 e MgCO_3) com a sílica (SiO_2) presente no minério de ferro. A solubilidade do Si nas escórias é bastante variável, com as de alto forno apresentando, normalmente, maiores concentrações, mas com menor solubilidade, enquanto as escórias de aciarias, têm concentrações menores, com maior solubilidade (Korndörfer et al., 2003). Existe uma grande variação na composição e disponibilidade de Si nessas escórias, o que significa que nem todas as fontes são iguais, e a reatividade das escórias varia de acordo com a granulometria, o tipo de solo, a dosagem e o tempo de contato com o solo (Marafon, 2011). Além disso, os fertilizantes silicatos à base de escórias, incluindo as de alto-forno, de sílico-manganês, de aço-carbono e de P, apesar de econômicos

(Liang et al., 2015), têm em contrapartida impacto negativo no ambiente, devido ao potencial acúmulo de metais pesados contidos nessas matérias-primas.

Os silicatos de sódio e de potássio são as únicas formas de silicato solúvel em água que podem ser usadas como fertilizante silicatado solúvel, os quais são frequentemente aplicados em pulverizações foliares devido ao alto custo para aplicação no solo. Embora a aplicação foliar de Si seja ainda controversa (Liang et al., 2015), os efeitos benéficos dos sprays foliares no desempenho das culturas foram relatados em muitas espécies vegetais (Liang et al., 2005b; Wang et al., 2015c; Park et al., 2018).

Sobre os fertilizantes silicatados de liberação lenta, disponíveis comercialmente, sabe-se que são fabricados a partir de diferentes fontes de minerais ambientalmente amigáveis, como fosfato de magnésio fundido, fertilizante de silicato de potássio de liberação lenta e silicato de potássio e magnésio fundido (Guo-Chao et al., 2018).

O silicato de cálcio (CaSiO_3), dado como material alternativo ao calcário, é utilizado para corrigir a acidez do solo, principalmente em lavouras de cana-de-açúcar (Alovisi et al., 2018). De acordo com Corrêa et al. (2007), o uso de silicato de cálcio em solos ácidos é recomendável como fornecedor de Ca, Mg e Si para as culturas ou corretivo da acidez do solo. Os silicatos, por apresentarem comportamento e composições semelhantes aos carbonatos, podem substituir os calcários (Madeiras et al., 2010), uma vez que

aumentam a capacidade de troca e aporte de cátions (Ca^{2+}) no solo, pois em solução há liberação de íons hidroxila (OH^-) e/ou consumo de cátion hidrogênio (H^+), além da liberação de Ca^{2+} . No final da reação, há a formação da molécula de H_4SiO_4 no solo (Alleoni et al., 2009).

O ácido monossilícico (H_4SiO_4) é outra fonte de Si; porém empregada principalmente em pesquisas, devido ao grau de pureza e elevado custo (Assis et al., 2013).

A indústria de fertilizantes fosfatados tem gerado um subproduto que apresenta potencial para uso no solo com a finalidade de aportar Ca e Si ao meio, o AgroSiCa, subproduto da produção de fósforo elementar (Borges, 2018). Tal subproduto também contém F, o qual, juntamente com Si, poderá desempenhar efeito condicionador do solo quanto à redução da fixação de P e, conseqüentemente, aumento da disponibilidade para as plantas.

Assim, várias formas de fertilizantes à base de Si estão sendo produzidas; no entanto, os diferentes fertilizantes precisam ser validados em eficiência agrônômica e viabilidade econômica (Guo-Chao et al., 2018). Ressalta-se também que a resposta da planta à fertilização silicatada depende, em grande parte, da disponibilidade e da capacidade de fornecimento de Si no solo, impactada principalmente pelo teor disponível nos fertilizantes, pH, conteúdo de matéria orgânica, taxas de aplicação de fertilizantes minerais, dentre outros fatores edáficos e/ou ambientais (Liang et al., 1994; Savant et al., 1996; Park, 2001; Wang et al., 2001).

Considerações finais

O Brasil é o país que mais produz arroz na América do Sul. Em 2018, foram cultivados 1,8 milhão de hectares, com o arroz de terras altas ocupando cerca de 25% da área total cultivada (Embrapa Arroz e Feijão, 2021). As áreas de plantio de arroz de terras altas são planas ou ligeiramente onduladas, com excelentes propriedades físicas, mas com sérias limitações químicas, tornando-se produtivas após correção e adubação. Quanto à fertilização silicatada, a pesquisa conduzida ao longo de mais de 40 anos traz resultados muito promissores. Os efeitos nas plantas acumuladoras de Si, como arroz, são claros e amplamente divulgados, com ênfase na utilização de ferramentas moleculares que confirmam os resultados obtidos nas décadas de 1960 e 1970 do século 20. Portanto, os efeitos benéficos do Si devem ser disseminados nas regiões produtoras de arroz de terras altas, abrindo oportunidades para a inserção nos sistemas de cultivo integrativos e sustentáveis.

Referências

- ABED-ASHTIANI, F.; KADIR, J. B.; SELAMAT, A. B.; HANIF, A. H. B. M.; NASEHI, A. Effect of foliar and root application of silicon against rice blast fungus in MR219 rice 565 variety. **The Plant Pathology Journal**, v. 28, n. 2, p. 164-171, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5423/PPJ.2012.28.2.164>.
- ADAMS, F. Interactions of phosphorus with other elements in soils and plants. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 655-680.
- ADREES, M.; ALI, S.; RIZWAN, M.; ZIA-UR-REHMAN, M.; IBRAHIM, M.; ABBAS, F.; FARID, M.; QAYYUM, M. F.; IRSHAD, M. K. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 119, p. 186-197, Sept. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>.
- AHMAD, R. R.; ZAHEER, H. S.; ISMAIL, S. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Science**, v. 85, n. 1, p. 43-50, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(92\)90092-Z](https://doi.org/10.1016/0168-9452(92)90092-Z).
- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A.; CASAGRANDE, J. C.; SOARES, M. R. Química dos solos altamente intemperizados. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 381-447.
- ALOVISI, A. M. T.; AGUIAR, G. C. R.; ALOVISI, A. A.; GOMES, C. F.; TOKURA, L. K.; LOURENTE, E. R. P.; MAUAD, M.; SILVA, R. S. Efeito residual da aplicação de silicato de cálcio e magnésio nos atributos químicos do solo e na produtividade da cana-soca. **Revista Agrarian**, v. 11, n. 40, p. 150-158, 2018. DOI: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v11i40.6241>.
- ALVAREZ, J.; DATNOFF, L. E. The economic potential of silicon for integrated management and sustainable rice production. **Crop Protection**, v. 20, n. 1, p. 43-48, Feb. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00051-X).
- ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, v. 14, n. 2, p. 371-375, Apr. 1939.
- ASSIS, F. A.; MORAES, J. C.; AUAD, A. M.; COELHO, M. The effects of foliar spray application of silicon on plant damage levels and components of larval biology of the pest butterfly *Chlosyne lacinia saundersii* (Nymphalidae). **International Journal of Pest Management**, v. 59, n. 2, p. 128-134, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/09670874.2013.779049>.
- AYRES, A. S. Calcium silicate slag as a growth stimulant for sugarcane on low-silicon soils. **Soil Science**, v. 101, n. 3, p. 216-227, Feb. 1966. DOI: <https://doi.org/10.1097/00010694-196603000-00009>.

- BALASTA, M. L. F. C.; PEREZ, C. M.; JULIANO, B. O.; VILLAREAL, C. P.; LOTT, J. N. A.; ROXAS, D. B. Effects of silica level on some properties of *Oryza sativa* straw and hull. **Canadian Journal of Botany**, v. 67, n. 8, p. 2356-2363, Aug. 1989. DOI: <https://doi.org/10.1139/b89-301>.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGERIA, N. K.; DATNOFF, L. E.; SILVA, O. F. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 325-330, abr./jun. 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832001000200009>.
- BECKWITH, R. S.; REEVE, R. S. Studies on soluble silica in soils. 1: The sorption of silicon acid by soils and minerals. **Australian Journal Soil Research**, v. 1, n. 2, p. 157-168. 1963. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9630157>.
- BORGES, C. S. **Interação fósforo-silício-flúor em materiais de solo oxidado e uso benéfico de subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados na soja**. 2018. 138 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.175>.
- BRAIT, M. A. H. **Interação silício e fósforo na adsorção desses elementos em diferentes solos de Cerrado**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Jataí.
- BRASIL. Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Altera o Anexo ao Decreto nº 4.954, que aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de janeiro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**, 15 jan. 2004. Seção 1, p. 2.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 5, de 23 de fevereiro de 2007. Aprova as definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes minerais, destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**, 1 mar. 2007.
- BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; MA, J. F.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Beneficial elements. In: MARSCHNER, P. (ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. Elsevier: Amsterdam, 2011. p. 257-261.
- CARLISLE, E. M.; McKEAGUE, J. A.; SIEVER, R.; VAN SOEST, P. J. Silicon. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Geochemistry and the environment: the relation of other selected trace elements to health and disease**. Washington: National Academies Press, 1977. v. 2, p. 54-72.
- CARVALHO, M. T. M.; CASTRO, A. P.; FERREIRA, C. M.; LACERDA, M. C.; LANNA, A. C.; SILVA-LOBO, V. L.; SILVA, M. A. S.; COLOMBARI FILHO, J. M. **O arroz de terras altas como estratégia para segurança alimentar, intensificação ecológica e adaptação à mudança do clima: rumo aos objetivos de desenvolvimento sustentável para o milênio**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2020. 14 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado técnico, 252). <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1121735>.
- CASEY, W. H.; KINRADE, S. D.; KNIGHT, C. T. G.; RAINS, D. W.; EPSTEIN, E. Aqueous silicate complexes in wheat, *Triticum aestivum* L. **Plant, Cell & Environment**, v. 27, n. 1, p. 51-54, Jan. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2003.01124.x>.
- CHAGAS, R. C. S.; MURAOKA, T.; KORNDÖRFER, G. H.; CAMARGO, M. S. Silicon fertilization improve yield and quality of rice and pearl millet in cerrado soils. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 4, p. 899-907, July/Aug. 2016. DOI: <https://doi.org/10.14393/BJ-v32n4a2016-32792>.
- CHANDLER-EZELL, K.; PEARSALL, D. M.; ZEIDLER, J. A. Root and tuber phytoliths and starch grains document manioc (*Manihot esculenta*), arrowroot (*Maranta arundinacea*), and Ileren (*Calathea* sp.) at the real alto site, Ecuador. **Economic Botany**, v. 60, n. 2, p. 103-120, 2006.
- CHEN, J.; ZHANG, M.; ENEJI, A. E.; LI, J. Influence of exogenous silicon on UV-B radiation-induced cyclobutane pyrimidine dimmers in soybean leaves and its alleviation mechanism. **Journal of Plant Physiology**, v. 196-197, p. 20-27, June 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.01.019>.
- CHEONG, Y. W. Y.; HALAIS, P. Needs of sugar cane for silicon when growing in highly weathered latosols. **Experimental Agriculture**, v. 6, n. 2, p. 99-106, Apr. 1970. DOI: <https://doi.org/10.1017/S001447970000144>.
- CHIBA, Y.; MITANI, N.; YAMAJI, N.; MA, J. F. *HvLsi1* is a silicon influx transporter in barley. **Plant Journal**, v. 57, n. 5, p. 810-818, Mar. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03728.x>.

- CORRÊA, B. L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARCELINO, R.; MAUAD, M. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 9, p. 1307-1317, set. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000900013>.
- COSKUN, D.; BRITTO, D. T.; HUYNH, W. Q.; KRONZUCKER, H. J. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, e51877, July 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01072>.
- CRUZ, M. F. A.; RODRIGUES, F. A.; POLANCO, L. R.; CURVÊLO, C. R. S.; NASCIMENTO, K. J. T.; MOREIRA, M. A.; BARROS, E. G. Inducers of resistance and silicone on the activity of defense 614 enzymes in the soybean-*Phakopsora pachyrhizi* interaction. **Bragantia**, v. 72, n. 2, p. 162-172, Abr./June 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052013005000025>.
- CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, A. J. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 6, p. 849-853, Dec. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200800147>.
- DATNOFF, L. E. Differential gene expression of rice in response to silicon and 642 infections by *Magnaporthe oryzae*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, 5., 2010, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2010. p. 227-238.
- DATNOFF, L. E.; RAID, R. N.; SNYDER, G. H.; JONES, D. B. Effect of calcium silicate on blast and brown spot intensities and yields of rice. **Plant Disease**, v. 75, n. 7, p. 729-732, July 1991. DOI: <https://doi.org/10.1094/PD-75-0729>.
- DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; DEREN, C. W. Influence of silicon fertilizer grades on blast and brown spot development and on rice yields. **Plant Disease**, v. 76, n. 10, p. 1011-1013, Oct. 1992. DOI: <https://doi.org/10.1094/PD-76-1011>.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91-132.
- DEREN, C. W. Plant genotype, silicon concentration, and silicon-related responses. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, A.; KORNDÖRFER, G. H. (ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 149-158.
- DESHMUKH, R. K.; VIVANCOS, J.; GUERIN, V.; SONAH, H.; LABBE, C.; BELZILE, F.; BELANGER, R. R. Identification and functional characterization of silicon transporters in soybean using comparative genomics of major intrinsic proteins in Arabidopsis and rice. **Plant Molecular Biology**, v. 83, n. 4/5, p. 303-315, Nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-013-0087-3>.
- DIETZEL, M. Dissolution of silicates and the stability of polysilicon acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 64, n. 19, p. 3275-3281, Oct. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00426-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00426-9).
- EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Dados conjunturais do arroz (área, produção e rendimento)**: Brasil (1986-2019). Disponível em: <http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>. Acesso em: 23 jan. 2021.
- EPSTEIN, E. Silicon in plants: facts vs. concepts. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 1-15.
- EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p. 641-664, 1999.
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 91, n. 1, p. 11-17, Jan. 1994. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta, 2006. 403 p.
- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2005. 183 p.
- FAROOQ, M.; WAHID, A.; LEE, D. J.; ITO, O.; SIDDIQUE, K. H. M. Advance in drought resistance of rice. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 28, n. 4, p. 199-217, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/07352680902952173>.
- FAWE, A.; MENZIES, J. G.; CHERIF, M.; BELANGER, R. R. Silicon, and disease resistance in dicotyledons. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 159-170.

FERREIRA, C. M. **Fundamentos para a implantação e avaliação da produção sustentável de grãos**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2008. 228 p.

FERREIRA, C. M.; STONE, L. F.; SILVA, M. A. S. Impactos planejados e alcançados em projetos de pesquisa agrícola: um estudo de caso. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 37, n. 1, e26696, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2020.v37.26696>.

FREITAS, L. C.; COSTA FILHO, J. F.; ALOISI, R. R.; MELO, W. J. Contribuição ao estudo da sílica solúvel em alguns perfis de solos. **Científica**, v. 5, n. 2, p. 296-305, 1977.

GITZ, D. C.; LIU-GITZ, L.; BRITZ, S. J.; SULLIVAN, J. H. Ultraviolet-B effects on stomatal density, water-use efficiency, and stable carbon isotope discrimination in four glasshouse-grown soybean (*Glycine max*) cultivars. **Environmental and Experimental Botany**, v. 53, n. 3, p. 343-355, June 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.04.005>.

GONG, H. J.; RANDALL, D. P.; FLOWERS, T. J. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. **Plant, Cell & Environment**, v. 29, n. 10, p. 1970-1979, Oct. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01572.x>.

GONG, H.; CHEN, K.; CHEN, G.; WANG, S.; ZHANG, C. Effects of silicon on growth of wheat under drought. **Journal of Plant Nutrition**, v. 26, n. 5, p. 1055-1063, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1081/PLN-120020075>.

GREGER, M.; LANDBERG, T. Silicon reduces cadmium and arsenic in field grown crops. **Silicon**, v. 1, p. 1-5, 2015.

GREGER, M.; LANDBERG, T.; VACULÍK, M. Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. **Plants**, v. 7, n. 2, p. 41, May 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants7020041>.

GREGOIRE, C.; REMUS-BOREL, W.; VIVANCOS, J.; LABBE, C.; BELZILE, F.; BELANGER, R. R. Discovery of a multigene family of aquaporin silicon transporters in the primitive plant *Equisetum arvense*. **Plant Journal**, v. 72, n. 2, p. 320-330, Oct. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2012.05082.x>.

GUIMARÃES, C. M.; SANTOS, A. B.; MAGALHÃES, A. M.; STONE, L. F. Sistemas de cultivo. In: SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. (ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. 2. ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. p. 53-96.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. D. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, p. 201-213, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. D. Determination of the silicon concentration in plant material using Tiron extraction. **New Phytologist**, v. 188, n. 3, p. 902-906, Nov. 2010. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03416.x>.

GUO-CHAO, Y.; NIKOLIC, M.; UM-JUN, Y.; ZHUO-XI, X.; YONG-CHAO, L. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 10, p. 2138-2150, Oct. 2018. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62037-4).

HENRIET, C.; DRAYE, X.; OPPITZ, I.; SWENNEN, R.; DELVAUX, B. Effects, distribution, and uptake of silicon in banana (*Musa* spp.) under controlled conditions. **Plant and Soil**, v. 287, n. 1/2, p. 359-374, Aug. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9085-4>.

HERNANDEZ-APAOLAZA, L. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? a review. **Planta**, v. 240, p. 447-458, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x>.

HORIGUCHI, T.; MORITA, S. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants VI. Effect of silicone on alleviation of manganese toxicity of barley. **Journal of Plant Nutrition**, v. 10, n. 17, p. 2299-2310, Nov. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904168709363778>.

INOSTROZA-BLANCHETEAU, C.; REYES-DÍAZ, M.; ARELLANO, A.; LATSAGUE, M.; ACEVEDO, P.; LOYOLA, R.; ARCE-JOHNSON, P.; ALBERDI, M. Effects of UV-B radiation on anatomical characteristics, phenolic compounds and gene expression of the phenylpropanoid pathway in highbush blueberry leaves. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 85, p. 85-95, Dec. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.10.015>.

- JANSEN, M. A. K.; GABA, V.; GREENBERG, B. M. Higher plants and UV-B radiation: balancing damage, repair and acclimation. **Trends in Plant Science**, v. 3, n. 4, p. 131-135, Apr. 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01215-1](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01215-1).
- JARVIS, S. C. The uptake and transport of silicon by perennial ryegrass and wheat. **Plant and Soil**, v. 97, n. 3, p. 429-437, Oct. 1987. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02383233>.
- KAKANI, V. G.; REDDY, K. R.; ZHAO, D.; MOHAMMED, A. R. Effects of ultraviolet-B radiation on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) morphology and anatomy. **Annals of Botany**, v. 91, n. 7, p. 817-826, June 2003. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcg086>.
- KATARIA, S.; JAJOO, A.; GURUPRASAD, K. N. Impact of increasing Ultraviolet-B (UV-B) radiation on photosynthetic processes. **Journal of Photochemistry and Photobiology. B**, v. 137, p. 55-66, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.02.004>.
- KAUFMAN, P. B.; BIGELOW, W. C.; PETERING, L. B.; DROGOSZ, F. B. Silica in developing epidermal cells of *Avena* internodes: electron microprobe analysis. **Science**, v. 166, n. 3908, p. 1015-1017, Nov. 1969. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.166.3908.1015>.
- KIKUTA, M.; YAMAMOTTO, Y.; PASOLON, Y. B.; REMBON, F. S.; MIYAZAK, A.; MAKIHARA, D. How growth and yield of upland rice vary with topographic conditions: a case of Slash-and-burn rice farming in South Konawe Regency, Southeast Sulawesi Province, Indonesia. **Tropical Agriculture and Development**, v. 60, n. 3, p. 162-171, 2016. DOI: <https://doi.org/10.11248/jsta.60.162>.
- KNIGHT, C. T. G.; KINRADE, S. D. A primer on the aqueous chemistry of silicon. In: DANTOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 57-84.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **Revista STAB**, v. 21, n. 2, p. 6-9, 2002.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. 2. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2003. 22 p. (Boletim técnico, 1).
- KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H.; ULLOA, M.; PERDOMO, R.; POWELL, C.; DEREN, C.; DATNOFF, L. E. **Soil and plant silicon calibration for rice production**. Belle Glade: Rice Council, 1999. p. 14-15. Manuscript prepared for the Rice Council Meeting.
- KÜPFER, C.; KAHNT, G. Effects of the application of amorphous silica on transpiration and photosynthesis of soybean plants under varied soil and relative air humidity conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 168, n. 5, p. 318-325, June 1992. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1992.tb01015.x>.
- LIANG, Y. C.; HUA, H. X.; ZHU, Y. G.; ZHANG, J.; CHENG, C. M.; RÖMHELD, V. Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport. **New Phytologist**, v. 172, n. 1, p. 63-72, Oct. 2006a. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01797.x>.
- LIANG, Y. C.; MA, T. S.; LI, F. J.; FENG, Y. J. Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, n. 13/14, p. 2285-2297, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103629409369189>.
- LIANG, Y. C.; NIKOLIC, M.; BÉLANGER, R.; GONG, H. J.; SONG, A. L. **Silicon in agriculture: from theory to practice**. Dordrecht: Springer, 2015. 235 p.
- LIANG, Y. C.; SI, J.; RÖMHELD, V. Silicon uptake and transport is an active process in *Cucumis sativus*. **New Phytologist**, v. 167, n. 3, p. 797-804, Sept. 2005a. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01463.x>.
- LIANG, Y. C.; SUN, W. C.; SI, J.; RÖMHELD, V. Effects of foliar- and root-applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *Cucumis sativus*. **Plant Pathology**, v. 54, n. 5, p. 678-685, Oct. 2005b. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01246.x>.
- LIANG, Y. C.; SUN, W. C.; ZHU, Y. G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, v. 147, n. 2, p. 422-428, May 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>.

- LIANG, Y. C.; ZHANG, W. H.; CHEN, Q.; LIU, Y. L.; DING, R. X. Effect of exogenous silicon (Si) on H⁺-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Environmental and Experimental Botany**, v. 57, n. 3, p. 212-219, Oct. 2006b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.05.012>.
- LIDON, F. C.; RAMALHO, J. C. Impact of UV-B irradiation on photosynthetic performance and chloroplast membrane components in *Oryza sativa* L. **Journal of Photochemistry and Photobiology. B**, v. 104, n. 3, p. 457-466, Sept. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2011.05.004>.
- LUX, A.; LUXOVÁ, M.; ABE, J.; TANIMOTO, E.; HATTORI, T.; INANAGA, S. The dynamics of silicon deposition in the sorghum root endodermis. **New Phytologist**, v. 158, n. 3, p. 437-441, June 2003. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00764.x>.
- LUX, A.; LUXOVÁ, M.; HATTORI, T.; INANAGA, S.; SUGIMOTO, Y. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. **Physiologia Plantarum**, v. 115, n. 1, p. 87-92, May 2002. DOI: <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1150110.x>.
- MA, J. F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 50, n. 1, p. 11-18, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>.
- MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier, 2002. 274 p.
- MA, J. F.; TAMAI, K.; YAMAJI, N.; MITANI, N.; KONISHI, S.; KATSUHARA, M.; ISHIGURO, M.; MURATA, Y.; YANO, M. A silicon transporter in rice. **Nature**, v. 440, p. 688-691, Mar. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04590>.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. A cooperative system of silicon transport in plants. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 7, p. 435-442, July 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 8, p. 392-397, Aug. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>.
- MA, J. F.; YAMAJI, N.; MITANI, N.; TAMAI, K.; KONISHI, S.; FUJIWARA, T.; KATSUHARA, M.; YANO, M. An efflux transporter of silicon in rice. **Nature**, v. 448, p. 209-212, July 2007. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature05964>.
- MADEIROS, L. B.; VIEIRA, A. O.; COSTA, D. P. B. Aplicação de escória siderúrgica: silício no solo e na cana-de-açúcar. **Pubvet**, v. 4, n. 26, art. 889, 2010.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 254 p.
- MARAFON, A. C. Adubação silicatada em cana-de-açúcar é objeto de estudo. **Jornal Cana**, 2011. p. 56.
- MATICHENKOV, V. V.; BOCHARNIKOVA, E. A. The relation between silicon and soil physical and chemical properties. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 209-219.
- MATOH, T.; KAIRUSMEE, P.; TAKAHASHI, E. Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 32, n. 2, p. 295-304, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.1986.10557506>.
- MEENA, V. D.; DOTANIYA, M. L.; COUMAR, V.; RAJENDIRAN, S.; KUNDU, S. A.; RAO, A. S. A case of silicon fertilization to improve crop yields in tropical soil. **Proceedings of the National Academy of Science, India Section B: Biological Sciences**, v. 84, n. 3, p. 505-518, July/Sept. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0270-y>.
- MELO, S. P. **Silício e fósforo para estabelecimento do capim-marandu num Latossolo Vermelho-Amarelo**. 2005. 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MITANI, N.; CHIBA, Y.; YAMAJI, N.; MA, J. F. Identification and characterization of maize and barley Isi2-like silicon efflux transporters reveals a distinct silicon uptake system from that in rice. **The Plant Cell**, v. 21, n. 7, p. 2133-2142, July 2009a. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.109.067884>.
- MITANI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 414, p. 1255-1261, Apr. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eri121>.

- MITANI, N.; MA, J. F.; IWASHITA, T. Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and Cell Physiology**, v. 46, n. 2, p. 279-283, Feb. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pci018>.
- MITANI, N.; YAMAJI, N.; AGO, Y.; IWASAKI, K.; MA, J. F. Isolation and functional characterization of an influx silicon transporter in two pumpkin cultivars contrasting in silicon accumulation. **Plant Journal**, v. 66, n. 2, p. 231-240, Apr. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04483.x>.
- MITANI, N.; YAMAJI, N.; MA, J. F. Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, v. 50, n. 1, p. 5-12, Jan. 2009b. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>.
- MONTPETIT, J.; VIVANCOS, J.; MITANI-UENO, N.; YAMAJI, N.; REMUSBOREL, W.; BELZILE, F.; MA, J. F.; BELANGER, R. R. Cloning, functional characterization and heterologous expression of TaLsi1, a wheat silicon transporter gene. **Plant Molecular Biology**, v. 79, n. 1/2, p. 35-46, May 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-012-9892-3>.
- MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 651-681, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>.
- NANAYAKKARA, 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**, v. 303, n. 1/2, p. 83-94, Feb. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9488-x>.
- NEWMANN, D.; NIEDEN, U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. **Phytochemistry**, v. 56, n. 7, p. 685-692, Apr. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)00472-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00472-6).
- NIKOLIC, M.; NIKOLIC, N.; LIANG, Y. C.; KIRKBY, E. A.; ROMHELD, V. Germanium-68 as an adequate tracer for silicon transport in plants. Characterization of silicon uptake in different crop species. **Plant Physiology**, v. 143, n. 1, p. 495-503, Jan. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.106.090845>.
- OKUDA, A.; TAKAHASHI, E. Studies on the physiological role of silicon in crop plants: Part 6: effect of silicon on iron uptake by rice plant and oxidation power of root. **Journal of the Science of Soil Manure**, v. 33, p. 59-64, 1962.
- OKUDA, A.; TAKAHASHI, E. The role of silicon: In: SYMPOSIUM OF THE INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE, Baltimore, 1964. **The mineral nutrition of the rice plant**. Baltimore: John Hopkins Press, 1965. p.123-146.
- OLIVEIRA NETO, A. A. (org.). **A cultura do arroz**. Brasília, DF: Conab, 2015. 180 p. http://biblioteca.conab.gov.br/phi82/pdf/2015_Cultura_do_arroz.pdf.
- PARK, C. S. Past and future advances in silicon research in the Republic of Korea. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 359-371.
- PARK, Y. G.; MUNEER, S.; KIM, S.; HWANG, S. J.; JEONG, B. R. Foliar or subirrigational silicon supply modulates salt stress in strawberry during vegetative propagation. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 59, p. 11-18, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0002-6>.
- PERRY, C. C.; LU, Y. Preparation of silicas from silicon complexes; role of cellulose in polymerization and aggregation control. **Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions**, v. 88, p. 2915-2921, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1039/FT9928802915>.
- PONTIGO, S.; RIBERA, A.; GIANFREDA, L.; MORA, M. D.; NIKOLIC, M.; CARTES, P. Silicon in vascular plants: uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. **Planta**, v. 242, p. 23-37, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2333-1>.
- POZZA, A. A. A.; CURI, N.; COSTA, E. T. S.; GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J. G. S. M.; MOTTA, P. E. F. Retenção e desorção competitivas de ânions inorgânicos em gibsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 11, p. 1627-1633, nov. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001100015>.
- PRABHU, A. S.; BARBOSA FILHO, M. P.; FILIPPI, M. C.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon from rice disease control perspective in Brazil. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 293-311.

- PRYCHID, C. J.; FURNESS C. A.; RUDALL, P. J. Systematic significance of cell inclusions in *Haemodorraceae* and allied families: Silica bodies and tapetal raphides. **Annals of Botany**, v. 92, n. 4, p. 571-580, Oct. 2003a. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcg172>.
- PRYCHID, C. J.; RUDALL, P. J.; GREGORY, M. Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons. **Botanical Review**, v. 69, p. 377-440, 2003b. DOI: [https://doi.org/10.1663/0066-8101\(2004\)069\[0377:SABOSB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0066-8101(2004)069[0377:SABOSB]2.0.CO;2).
- RAIJ, B. V.; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, v. 32, p. 223-231, 1973. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051973000100011>.
- RAINS, D. W.; EPSTEIN, E.; ZASOSKI, R. J.; ASLAM, M. Active silicon uptake by wheat. **Plant and Soil**, v. 280, p. 223-228, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3082-x>.
- RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plant. **Biological Reviews**, v. 58, n. 2, p. 179-207, May 1983. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1983.tb00385.x>.
- RAVINDRAN, K. C.; INDRAJITH, A.; PRATHEESH, P. V.; SANJIVIRAJA, K.; BALAKRISHNAN, V. Effect of ultraviolet-B radiation on biochemical and antioxidant defense system in *Indigofera tinctoria* L. seedlings. **International Journal of Engineering, Science and Technology**, v. 2, n. 5, p. 226-232, 2010.
- RICHMOND, K. E.; SUSSMAN, M. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 6, n. 3, p. 268-272, June 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00041-4).
- RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. Silicon and rice disease management. **Fitopatologia Brasileira**, v. 30, n. 5, p. 457-470, Sept./Oct. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-41582005000500001>.
- RODRIGUES, F. A.; JURICK, W. M.; DATNOFF, L. E.; JONES, J. B.; ROLLINS, J. A. Silicon influences cytological and molecular events in compatible and incompatible rice - *Magnaporthe grisea* interactions. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 66, n. 4, p. 144-159, Apr. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2005.06.002>.
- ROMERO-ARANDA, M. R.; JURADO, O.; CUARTERO, J. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. **Journal of Plant Physiology**, v. 163, n. 8, p. 847-855, July 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.05.010>.
- SANGSTER, A. G.; HODSON, M. J.; TUBB, H. J. Silicon deposition in higher plants. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 85-113.
- SANTOS, A. B.; PRABHU, A. S.; FERREIRA, E.; FAGERIA, N. K. Fertilização silicatada na severidade de brusone e na incidência de insetos-praga em arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 537-543, set./out. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500005>.
- SAPRE, S.; VAKHARIA, D. Role of silicon under water deficit stress in wheat: (biochemical perspective): a review. **Agricultural Reviews**, v. 37, n. 2, p. 109-116, June 2016.
- SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, v. 58, p. 151-199, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60255-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60255-2).
- SINGH, A.; SINGH, A. K.; SINGH, V.; SINGH N.; SINGH, V. N.; SHAMIM, M.; VIKRAM, P.; SINGH, S. Genetic variability among traits associated with grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) exposed to drought at flowering stage. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 16, p. 1252-1264, Apr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7782>.
- SMITH, S. R.; GLE, C.; ABBRIANO, R. M.; TRALLER, J. C.; DAVIS, A.; TRENTACOSTE, E.; VERNET, M.; ALLEN, A. E.; HILDEBRAND, M. Transcript level coordination of carbon pathways during silicon starvation-induced lipid accumulation in the diatom *Thalassiosira pseudonana*. **New Phytologist**, v. 210, n. 3, p. 890-904, May 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13843>.
- SOMMER, M.; KACZOREK, D.; KUZYAKOV, Y.; BREUER, J. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes: a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, n. 3, p. 310-329, June 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>.

- SOUSA, T. P.; SOUZA, A. C. A.; FILIPPI, M. C. C.; LANNA, A. C.; CORTÉS, M. V. B.; PINHEIRO, H. A.; SILVA, G. B. Bioagents and silicon promoting fast early upland rice growth. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 4, p. 3657-3668. Feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0753-0>.
- SOUZA, A. C. A. **Silício e bioagentes no controle da brusone do arroz**. 2018. 66 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- SOUZA, A. C. A.; CORTÉS, M. V. B.; SILVA, G. B.; SOUSA, T. P.; RODRIGUES, F. A.; FILIPPI, M. C. C. Enzyme-induced defense response in the suppression of rice leaf blast (*Magnaporthe oryzae*) by silicon fertilization and bioagents. **International Journal of Research Studies in Biosciences**, v. 3, n. 5, p. 22-32, May 2015.
- STAMATAKIS, A.; PAPADANTONAKIS, N.; LYDAKIS-SIMANTIRIS, N.; KEFALAS, P.; SAVVAS, D. Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. **Acta Horticulturae**, v. 609, p. 141-147, Jan. 2003. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.609.18>.
- SUN, H.; GUO, J.; DUAN, Y. K.; ZHANG, T. T.; HUO, H. Q.; GONG, H. J. Isolation and functional characterization of CsLsi1, a silicon transporter gene in *Cucumis sativus*. **Physiologia Plantarum**, v. 159, n. 2, p. 201-214, Feb. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.12515>.
- SUZUKI, N. Nature of resistance to blast. In: SYMPOSIUM AT THE INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE, 1963, Los Baños. **The rice blast disease**. Baltimore: IRRRI: J. Hopkins, 1965. p. 277-301.
- TAKAHASHI, E.; MA, J. F.; MIYAKE, Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, v. 2, n. 2, p. 99-102, 1990.
- TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; ALOVISI, A. A. Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 9-16, 2007.
- TORESANO-SANCHEZ, F.; VALVERDE-GARCIA, A.; CAMACHO-FERRE, F. Effect of the application of silicon hydroxide on yield and quality of cherry tomato. **Journal of Plant Nutrition**, v. 35, n. 4, p. 567-590, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.644375>.
- TORRES BOEGER, M. R.; POULSON, M. Efeitos da radiação ultravioleta-B sobre a morfologia foliar de *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. (*Brassicaceae*). **Acta Botanica Brasílica**, v. 20, n. 2, p. 329-338, abr./jun. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062006000200008>.
- TREDER, W.; CIESLINSKI, G. Effect of silicon application on cadmium uptake and distribution in strawberry plants grown on contaminated soils. **Journal of Plant Nutrition**, v. 28, n. 6, p. 917-929, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1081/PLN-200058877>.
- TRIPATHI, D. K.; SINGH, S.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M.; DIBEYA, N. K.; CHAUHAN, D. K. Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 110, p. 70-81, Jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.026>.
- TUBANA, B. S.; BABU, T.; DATNOFF, L. E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. **Soil Science**, v. 181, n. 9/10, p. 393-411, Sept./Oct. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000179>.
- VAN BOCKHAVEN, J.; DE VLEESSCHAUWER, D.; HOFTE, M. Towards establishing broad-spectrum disease resistance in plants: Silicon leads the way. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 5, p. 1281-1293, Mar. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ers329>.
- VERDAGUER, D.; LLORENS, L.; BERNAL, M.; BADOSA, J. Photomorphogenic effects of UVB and UVA radiation on leaves of six Mediterranean sclerophyllous woody species subjected to two different watering regimes at the seedling stage. **Environmental and Experimental Botany**, v. 79, p. 66-75, July 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.01.008>.
- VIVANCOS, J.; DESHMUKH, R.; GREGOIRE, C.; REMUS-BOREL, W.; BELZILE, F.; BELANGER, R. R. Identification and characterization of silicon efflux transporters in horsetail (*Equisetum arvense*). **Journal of Plant Physiology**, v. 200, p. 82-89, Aug. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.06.011>.
- VULAVALA, V. K. R.; ELBAUM, R.; YERMIYAHU, U.; FOGELMAN, E.; KUMAR, A.; GINZBERG, I. Silicon fertilization of potato: Expression of putative transporters and tuber skin quality. **Planta**, v. 243, n. 1, p. 217-229, Jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2401-6>.

- WANG, H. L.; LI, C. H.; LIANG, Y. C. Agricultural utilization of silicon in China. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 343-358.
- WANG, H. S.; YU, C.; FAN, P. P.; BAO, B. F.; LI, T.; ZHU, Z. J. Identification of two cucumber putative silicon transporter genes in *Cucumis sativus*. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 34, p. 332-338, 2015a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-014-9466-5>.
- WANG, M.; GAO, L. M.; DONG, S. Y.; SUN, Y. M.; SHEN, Q. R.; GUO, S. W. Role of silicon on plant-pathogen interactions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, article 701, May 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00701>.
- WANG, S.; LIU, P.; CHEN, D.; YIN, L.; LI, H.; DENG, X. Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, article 759, Sept. 2015b. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00759>.
- WANG, S.; WANG, F. Y.; GAO, S. C. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 4, p. 2837-2845, Feb. 2015c. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3525-0>.
- WILLIAMS, E. D.; VLAMIS, J. The effect of silicone on yield and manganese-54 uptake and distribution in the leaves of barley plants grown in culture solutions. **Plant Physiology**, v. 32, n. 5, p. 404-409, Sept. 1957. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.32.5.404>.
- WINSLOW, M. D. Silicon disease resistance and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. **Crop Science**, v. 32, n. 5, p. 1208-1213, Sept./Oct. 1992. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200050030x>.
- YAMAJI, N.; CHIBA, Y.; MITANI-UENO, N.; MA, J. F. Functional characterization of a silicon transporter gene implicated in silicon distribution in barley. **Plant Physiology**, v. 160, n. 3, p. 1491-1497, Nov. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.112.204578>.
- YAMAJI, N.; MITATANI, N.; MA, J. F. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. **The Plant Cell**, v. 20, n. 5, p. 1381-1389, May 2008. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.108.059311>.
- YAO, X. Q.; CHU, J. Z.; WANG, G. Y. Effects of drought stress and selenium supply on growth and physiological characteristics of wheat seedlings. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 31, p. 1031-1036, Sept. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0322-3>.
- YAO, X.; LIU, Q. Changes in morphological, photosynthetic and physiological responses of Mono Maple seedlings to enhanced UV-B and to nitrogen addition. **Plant Growth Regulation**, v. 50, article 165, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-006-9116-4>.
- YIN, L.; WANG, S.; TANAKA, K.; FUJIHARA, S.; ITAI, A.; DENG, S.; ZHANG, S. Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. **Plant, Cell & Environment**, v. 39, n. 2, p. 245-258, Feb. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.12521>.
- ZANETTI, L. V.; ROZINDO, C.; MILANEZ, D.; GAMA, V. N.; MILANEZ, C. R. D.; GAMA, V. N.; AGUILAR, M. A. G.; SOUZA, C. A. S.; CAMPOSTRINI, E.; FERRAZ, T. M.; FIGUEIREDO, F. A. M. M. A. Leaf application of silicon in young cacao plants subjected to water deficit. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 3, p. 215-223, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000300003>.
- ZHANG, J.; ZOU, W. H.; LI, Y.; FENG, Y. Q.; ZHANG, H.; WU, Z. L.; TU, Y. Y.; WANG, Y. T.; CAI, X. W.; PENG, L. C. Silica distinctively affects cell wall features and lignocellulosic saccharification with large enhancement on biomass production in rice. **Plant Science**, v. 239, p. 84-91, Oct. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.07.014>.
- ZHU, Y. X.; GONG, H. J. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n. 2, p. 455-472, Apr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>.
- ZHU, Z.; WEI, G.; LI, J.; QIAN, Q.; YU, J. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, v. 167, n. 3, p. 527-533, Aug. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.04.020>.
- ZUCCARINI, P. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biologia Plantarum**, v. 52, n. 1, p. 157-160, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10535-008-0034-3>.

Embrapa Arroz e Feijão
Rod. GO 462 Km 12 Zona Rural,
Caixa Postal 179
CEP 75375-000,
Santo Antônio de Goiás, GO
Fone: (62) 3533 2105
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

1ª edição
Publicação digital - PDF (2021)



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Comitê de Publicações
da Embrapa Arroz e Feijão

Presidente
Roselene de Queiroz Chaves
Secretário-Executivo
Luiz Roberto Rocha da Silva

Membros
*Ana Lúcia Delalibera de Faria, Luís Fernando
Stone, Newton Cavalcanti de Noronha Júnior,
Tereza Cristina de Oliveira Borba*

Supervisão editorial
Luiz Roberto R. da Silva

Revisão de texto
Luiz Roberto R. da Silva

Normalização bibliográfica
Ana Lúcia D. de Faria (CRB 1/324)

Editoração eletrônica
Fabiano Severino

Foto da capa
Sebastião José de Araújo

CGPE 016890