

Adubação com silício: influência sobre o solo, planta, pragas e patógenos

Fertilization with silicon: influence on soil, plant, pests and pathogens

*Lucas da Silva Mendes¹, Carlos Henrique Eiterer de Souza²,
Vanessa Júnia Machado³*

¹ Mestrando em Fitopatologia na Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

² Professor Ms. do Centro Universitário de Patos de Minas

³ Mestranda em Fertilidade do Solo na Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Resumo: O Silício (Si) é considerado o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre. Embora não seja reconhecido como elemento essencial, pode ser bastante exigido por algumas plantas, e quando o Si é disponibilizado, os trabalhos mostram o importante papel no crescimento e na nutrição mineral; ele aumenta a resistência mecânica a doenças ao ataque de pragas e melhora as condições químicas adversas. Portanto, plantas adubadas com Si levaram autores a levantarem a hipótese deste elemento estar relacionado com a indução de reações de defesa da planta. A presente revisão visa abordar a influência da adubação com silício no solo, nas plantas, nas pragas e nos patógenos. Portanto, o Si pode ser considerado como um elemento benéfico ou útil, e apresenta um potencial comercial elevado como produto natural alternativo para redução de doenças e pragas.

Palavras-chave: abundância; essencialidade; crescimento; resistência.

Abstract: The Silicon (Si) is considered the second most abundant element in Earth's crust. Although not recognized as an essential element, it can be fairly required by some plants, and when Si is available, the papers show the important role in growth and nutrition; it increases the mechanical resistance to disease and insect attack, and improves the adverse chemical conditions. Therefore, plants fertilized with Si have led the authors to raise the hypothesis of this element is related with the induction of plant defense reactions. This review aims to address the influence of silicon fertilization on soil, on plants, pests and pathogens.

Keywords: abundance; essentiality; growth; resistance.

Introdução

O efeito da nutrição mineral das plantas é normalmente analisado em termos do aumento de produtividade. No entanto, ela também tem efeitos na qualidade do

produto colhido e na sua resistência ao ataque de doenças e pragas. Embora os fisiologistas não reconheçam o silício (Si) como elemento essencial, existem amplas evidências de que quando disponível para as plantas, o Si tem importante papel no crescimento e na nutrição mineral ele também aumenta a resistência mecânica a doenças causadas por fungos, ao ataque de pragas e melhora as condições químicas adversas (ALCOFORADO, 1996).

Segundo Alves (1998), a necessidade de controlar pragas e doenças nas lavouras tem feito o homem buscar diferentes soluções, muitas das quais bastante eficientes e tidas como revolucionárias, como ocorreu com o advento dos agroquímicos. Todavia, o uso indevido de muitos produtos vem causando problemas graves por intoxicações diretas ao aplicar ou consumir o alimento tratado, ou por danos ao ambiente, uma vez que muitos organismos não-alvos também acabam atingidos.

Alguns resíduos siderúrgicos, empregados como corretivos da acidez, têm-se mostrado uma alternativa viável para o aproveitamento de parte desses subprodutos da siderurgia. Entre esses, as escórias, cujos componentes neutralizantes são os silicatos de cálcio e magnésio; comportam-se de forma semelhante aos calcários. Esses resíduos apresentam, geralmente, teores elevados de micronutrientes, justificando sua utilização como fertilizante (LOUSADA, 1987).

A importância de aplicação de Si para as plantas está relacionada principalmente ao aumento do crescimento e produção vegetal por meio de várias ações indiretas, deixando as folhas mais eretas com diminuição do autossombreamento; à redução do acamamento; à maior rigidez estrutural dos tecidos; à proteção contra estresses abióticos como redução de toxicidade de Fe, Mn, Al e Na; à diminuição na incidência de patógeno; e ao aumento na proteção contra herbívoros, incluindo os insetos fitófagos (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995).

O efeito do Si no controle de pragas, seu modo de ação e sua atuação na epidemia de diversos patossistemas ainda não estão totalmente esclarecidos. Existe a hipótese de formação de barreira física, fundamentada na forma de Si acumular-se nas plantas. Em seu movimento ascendente via apoplasto desde as raízes até as folhas, o Si polimeriza-se nos espaços extracelulares, acumulando-se nas paredes das células epidérmicas das folhas e dos vasos do xilema (FAWE et al., 2001). Contudo, a alteração da nutrição da planta promovida pela adubação silicatada e a observação de aumento da atividade de enzimas como peroxidase e polifenoloxidase, presença de fitoalexinas em plantas suplementadas com Si, levantaram também a hipótese de seu envolvimento na indução das reações de defesa da planta (BELANGER; MENZIES, 2002; BÉLANGER et al., 2003; POZZA et al., 2004).

O silício

O silício (Si), depois do oxigênio (O), é o elemento mais abundante na litosfera, representando 27,7% da crosta terrestre. Está presente em minerais primários, como feldspato, augita, quartzo e mica, e secundários, como caulinita, montmorilonita, illita e clorita, todos com resistência diferente ao intemperismo, que alcança seu ponto máximo no quartzo e mínimo no feldspato (MALAVOLTA, 1980; EXLEY, 1998). O grau de

intemperismo mineral depende de fatores como a temperatura, o pH e a composição iônica do solvente (EXLEY, 1998).

O Si, apesar de não ser um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento de plantas, tem sido aplicado visando principalmente a aumentar a resistência da planta a pragas e doenças. O Si também influencia os fatores abióticos como estresse salino, toxicidade a metais, falta de água, danos devido à radiação, balanço de nutrientes, altas temperaturas e geadas. Esses efeitos benéficos são atribuídos à alta acumulação de sílica nos tecidos da planta (FENG, 2004).

O Si tem sido empregado no Brasil na forma de adubação por ocasião da semeadura ou em cobertura, empregando a escória de siderurgia, que é abundante no país, constituída basicamente por silicato de cálcio e magnésio e termofosfatos magnesianos (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995).

Existem diversas fontes comerciais ricas em Si e passíveis de utilização na adubação. No entanto, algumas características importantes devem ser avaliadas na escolha do produto, tais como a solubilidade, que deve ser a mais alta possível, disponibilidade do produto, propriedade física, como partículas menores e uniformes visando facilitar a aplicação, presença de contaminantes, principalmente no caso de escórias de siderúrgicas, com custo relativamente baixo (GASCHO, 2001).

O silício no solo

As principais formas de Si presentes no solo são o silício solúvel (H_4SiO_4), que é desprovido de carga elétrica, o silício adsorvido ou precipitado com óxidos de Fe e Al e os minerais silicatados. Além do pH, a temperatura, o tamanho das partículas, a composição química e a presença de rachaduras no solo influenciam a solubilidade destes minerais. Alguns fatores do solo também influenciam na dissolução desses minerais, tais como matéria orgânica, umidade, potencial de óxido-redução e quantidade desses óxidos (RAIJ; CAMARGO, 1973).

Solos tropicais e subtropicais sujeitos ao intemperismo e a lixiviação, com cultivos sucessivos tendem a apresentar baixos níveis de Si trocáveis, devido à dessilicificação. Estes solos normalmente apresentam baixo pH, alto teor de alumínio, baixa saturação por bases e alta capacidade de fixação de fósforo, além de reduzida atividade microbiológica. Savant et al. (1997) ressaltam a necessidade da realização de levantamentos da presença de nutrientes nos solos e nas culturas em diferentes ecossistemas, objetivando desenvolver manejo nutricional integrado específico em cada região, incluindo a adubação silicatada.

A concentração de Si na fração argila depende do grau de lixiviação de SiO_2 e de bases do perfil, após intemperismo dos minerais silicatados de origem. Os solos brasileiros caracterizam-se por apresentar este processo de formação, em que se encontra material rico em argilominerais de baixa atividade, como a caulinita e óxidos de Fe e Al (KORNDÖFER, 1999).

Fontes de silicato de cálcio provenientes de siderurgia, wollastonia, silicato de magnésio e termosfosfato foram avaliadas por Korndofer; Gascho (1999) em quatro tipos de solo. Todas aumentaram o pH do solo em relação à testemunha. As plantas

tratadas com Si apresentaram sintomas de deficiência de Fe. A deficiência foi mais acentuada na Neossolo Quartzarênico, por ter baixo teor de Fe livre e onde o Si permaneceu mais disponível para as plantas. O Si foi mais fortemente adsorvido nos solos Latossolo Vermelho férrico, Latossolo Vermelho e Vermelho Amarelo.

O Silício nas plantas

A relação entre a absorção do Si e o crescimento vegetal foi investigada pela primeira vez há mais de 100 anos. O Si é um nutriente presente em diatomáceas, que o absorvem ativamente, provavelmente por meio do co-transporte com o Na. A falta de Si afeta negativamente a síntese de DNA e de clorofila nestes organismos (RAVEN, 1983).

Chen; Lewin (1969) comprovaram a essencialidade do Si para membros da família Equisitaceae (“cavalinha” ou “rabo de cavalo”). Os mecanismos bioquímicos responsáveis pelos efeitos da deficiência de Si ainda não estão elucidados, não havendo evidência para qualquer ligação orgânica (BIRCHALL et al., 1996). A comprovação da essencialidade do Si é muito difícil de ser obtida, devido à sua abundância na biosfera. O Si está presente em quantidades significativas mesmo em sais nutrientes, água e ar altamente purificado.

O Si não é considerado como elemento essencial para as plantas (JONES; HANDRECK, 1967) porque não atende aos critérios diretos e indiretos de essencialidade. No entanto, Epstein (2001) cita efeitos benéficos relatados em culturas adubadas com Si com resistência a doenças e pragas, resistência à toxicidade a metais, menor evapotranspiração, promoção de nodulação em leguminosas, efeitos na atividade de enzimas, efeitos na composição mineral, dentre outros. Por isso o Si é classificado como elemento benéfico ou útil (MALAVOLTA, 1980; MARSCHNER, 1995). Membros da família Equisitaceae são as únicas espécies de plantas conhecidas em que o Si é inquestionavelmente essencial (EPSTEIN, 1994).

A absorção de Si pelas plantas dá-se como ácido monossilícico, H_4SiO_4 , de forma passiva, com o elemento acompanhando a absorção da água (JONES; HANDRECK, 1967). A movimentação de Si, na forma monomérica H_4SiO_4 , até as raízes depende de sua concentração na solução do solo e da espécie da planta. Em baixas concentrações é reduzido o transporte por fluxo de massa, que passa a ser significativo quando se tratar de plantas acumuladoras cultivadas em solos com elevados teores do elemento (MARSCHNER, 1995).

O Si é transportado como H_4SiO_4 no xilema, e sua distribuição na planta está relacionada com a taxa transpiratória das partes da planta. Esta distribuição depende muito da espécie, sendo uniforme nas plantas que acumulam pouco Si e nas acumuladoras, como o arroz (*Oryza sativa*), 90% do elemento encontra-se na parte aérea (MALAVOLTA, 1980; KORNDÖRFER et al., 1999). O elemento é imóvel na planta, sendo depositado nas lâminas foliares, bainhas foliares, colmos, cascas e raízes, sendo que na lâmina foliar o acúmulo é maior que na bainha foliar. Entretanto, a casca do arroz é o órgão que mais acumula silício na planta, seguido pela folha bandeira e panícula.

Os efeitos benéficos do Si têm sido demonstrados em várias espécies de plantas, e no caso de problemas fitossanitários, é capaz de aumentar a resistência das plantas ao ataque de insetos e patógenos (EPSTEIN, 2001). O silício pode conferir resistência às plantas pela sua deposição, formando uma barreira mecânica (GOUSSAIN, 2002), e/ou pela sua ação como indutor do processo de resistência (FAWE *et al.*, 2001). Além disso, os benefícios proporcionados pela adubação silicatada podem resultar em ganhos de produtividade. Contudo, a indução de resistência nas plantas aloca recursos para a síntese de compostos de defesa, tornando-se necessária a verificação de possíveis quedas de produtividade (DÉLANO-FRIER *et al.*, 2004).

Adatia; Besford (1986) observaram, em pepineiros, vários efeitos devido à adição de Si (100 mg kg⁻¹) ao meio nutritivo: aumento no teor de clorofila, maior massa foliar (fresca e seca) específica, atraso na senescência e aumento da rigidez das folhas maduras, as quais mantinham-se mais horizontais. A melhor arquitetura foliar permite maior penetração de luz solar, maior absorção de CO₂ e diminuição da transpiração excessiva, o que permite o incremento da taxa fotossintética.

De modo geral, as plantas terrestres contêm Si em quantidades comparáveis aos macronutrientes, variando de 0,1 a 10 %, colocando-se como um constituinte mineral majoritário. Em culturas como o arroz e a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), o teor de Si pode igualar ou exceder aquele do N (EPSTEIN, 1995). Em média, estima-se que para produzir cinco toneladas de grãos, a cultura do arroz remove de 500 a 1.000 kg de SiO₂ por hectare. Em arroz, postula-se a essencialidade agrônômica do Si, em vista dos diversos benefícios advindos com a nutrição deste elemento. Estes benefícios incluem o aumento no crescimento e na produção, interações positivas com fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, aumento na resistência a estresses bióticos e abióticos e aumento na produtividade em solos problemáticos, como os solos orgânicos e solos ácidos com níveis tóxicos de Al, Fe e Mn (SAVANT *et al.*, 1997).

As plantas diferem bastante na sua capacidade de absorver o Si. Até mesmo genótipos de uma espécie podem apresentar diferentes concentrações de Si. Genótipos de arroz diferem no teor de Si, respondendo de modo distinto à aplicação do elemento (DEREN *et al.*, 1992). Grothge-Lima (1998) observou diferenças genotípicas significativas em soja, quando o substrato apresentava níveis elevados de Si. Com adição de 100 mg L⁻¹ de Si à solução nutritiva, o cultivar Garimpo Comum absorveu e translocou para a parte aérea 37 e 22% mais Si que o cultivar Emgopa 301, com a presença ou ausência de nodulação, respectivamente. Em um levantamento com 175 espécies vegetais que cresceram em um mesmo solo, Takahashi e Miyake (1977) distinguiram-nas em acumuladoras de Si, onde a absorção de Si excedeu a absorção de água, e não acumuladoras de Si, em que a absorção de Si foi similar ou menor do que a absorção de água.

Posteriormente, Miyake e Takahashi (1985) caracterizaram as plantas em três tipos quanto à absorção de Si: as acumuladoras, com um teor bastante elevado de Si, sendo a absorção ligada a respiração aeróbica. O arroz e a cana-de-açúcar são exemplos típicos deste grupo de plantas. As não acumuladoras, caracterizando-se por um baixo teor do elemento, mesmo com altos níveis de Si no meio, indicando um mecanismo de exclusão. Exemplo típico é o tomateiro, que acumula a maior parte do Si absorvido nas raízes, e as intermediárias, as quais apresentam uma quantidade considerável de Si,

quando a concentração do elemento no meio é alta. As cucurbitáceas e a soja, por exemplo, enquadram-se neste tipo, pois translocam o Si livremente das raízes para a parte aérea.

Efeito do silício sobre a ocorrência de pragas

Trabalhos conduzidos por Keeping e Meyer (2000), com cana-de-açúcar, mostraram os efeitos da aplicação de silicato de sódio conferindo resistência à broca-da-cana, *Eldana saccharina*. Segundo esses autores, foram observados aumentos significativos no teor de silício nas plantas tratadas com silicato de cálcio. Os tratamentos com silício reduziram significativamente os danos produzidos pela broca e o número de internódios broqueados.

Os mesmos autores constataram que o silicato de cálcio (CaSiO_3) confere resistência, comparado com o controle, reduzindo o tamanho da broca em 19,8% e em 24,4%. Variedades suscetíveis tiveram maior benefício do tratamento com silício do que as resistentes. Variedades resistentes não apresentaram efeitos significativos com o Si.

Goussain (2002) observou o efeito da aplicação de Si em plantas de milho (*Zea mays* L.) no desenvolvimento biológico da lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*). Avaliaram o desenvolvimento de lagartas alimentadas com folhas de milho retiradas de plantas tratadas com Si em comparação com lagartas alimentadas com folhas de milho não tratadas. Observaram que as mandíbulas das lagartas apresentaram desgaste acentuado na região incisora quando em contato com folhas com maior teor de Si. A aplicação de Si pode dificultar a alimentação destas, causando aumento de mortalidade e canibalismo, tornando as plantas de milho mais resistentes à lagarta-do-cartucho.

Savant et al. (1997) relataram os benefícios potenciais do silício aumentando e mantendo a produtividade de arroz, em decorrência do melhoramento do crescimento das plantas, aumento da produção, interações positivas com fertilizantes NPK, induzindo a resistência a estresses bióticos e abióticos e aumentando a produtividade em solos pobres.

Dentre os benefícios trazidos pelo Si, destacam-se o aumento na produtividade (AYRES, 1966); a diminuição no acamamento das plantas, já que as plantas tornam-se mais eretas devido ao aumento de rigidez dos tecidos (DEREN et al., 1993); o retardamento da senescência; o aumento na concentração da atividade da enzima rubisco-carboxilase, incrementando a taxa fotossintética (ADATIA; BESFORD, 1986); a diminuição na taxa de transpiração, representando uma estratégia na economia de água e a estimulação do crescimento devido à eliminação ou diminuição da toxidez por Mn e Fe (MALAVOLTA, 1980); e o aumento da tolerância de plantas de trigo à salinidade do solo (AHMAD et al., 1992).

Funcionalidade do Si em mecanismos de resistência das plantas aos patógenos

A primeira menção formal especulando a respeito do modo de ação do Si sobre a redução da severidade de uma doença data de 1940. Foi observada uma relação

direta entre a deposição de ácido silícico nos sítios de infecção de míldio e o grau de resistência da planta. Houve uma silicificação das células epidérmicas, inferindo-se que a penetração do tubo infectivo foi impedido pelo Si, agindo, assim, como uma barreira física. Deste modo, uma menor porcentagem de esporos, germinando na epiderme foliar, obteve sucesso na penetração e posterior colonização.

Os estudos das doenças controladas por Si tiveram início com as monocotiledôneas, pois estas absorvem grandes quantidades destes nutrientes. Numerosos trabalhos relatam o efeito benéfico do Si nestas plantas (DATNOFF *et al.*, 1997; EPSTEIN 2001; BÉLANGER *et al.*, 2003). Em cana-de-açúcar, Ayres (1966) relatou a redução dos sintomas de manchas foliares, como a ferrugem e a mancha parda, nos tratamentos com Si. Além deste, também foram estudados *damping-off* em pepinos (CHÉRIF *et al.*, 1994), gomose em limão cravo (FAGGIANI, 2002), o cancro-da-haste em soja (GROTHGE-LIMA, 1998) e a cercosporiose em cafeeiro (POZZA *et al.*, 2003).

Em pesquisa desenvolvida no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP), constatou-se que o fornecimento do Si por meio da solução nutritiva aumenta a resistência da soja ao cancro da haste. A extensão da lesão, provocada pelo fungo na medula de plantas de soja infectadas, diminuiu em até 90% (GROTHGE-LIMA, 1998).

A resistência das plantas às doenças pode ser aumentada por meio da alteração das respostas da planta ao ataque do parasita, aumentando a síntese de toxinas (fitoalexinas), que podem agir como substâncias inibidoras ou repelentes, e à formação de barreiras mecânicas (MARSCHNER, 1995). A resistência ao patógeno ocorre quando estes compostos acumulam-se rapidamente, e em altas concentrações, no local de infecção, resultando na morte do patógeno (FOSKET, 1994). Vários flavonoides, em exsudatos de raízes de leguminosas, podem atuar como supressores para certos fungos patogênicos, sendo considerados fitoalexinas. Nas interações patógeno-planta, certos produtos finais da via de biossíntese dos (iso) flavonoides servem como fitoalexinas nas reações de defesa da planta (HAHLBROCK; SCHEEL, 1989).

Barreiras mecânicas incluem mudanças na anatomia, como células epidérmicas mais grossas e um grau maior de lignificação e/ou silicificação. A sílica amorfa ou "opala", localizada na parede celular, tem efeitos notáveis sobre as propriedades físicas desta. O acúmulo e deposição de Si nas células da camada epidérmica pode ser uma barreira física efetiva na penetração da hifa (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995). Neste aspecto, o papel do Si incorporado à parede celular é análogo ao da lignina, que é um componente estrutural resistente a compressão. A incorporação do Si tem, pelo menos, dois efeitos positivos do ponto de vista energético: seu custo, que é 3,7% daquele relativo à incorporação da lignina, e a melhoria na interceptação da luz solar, portanto da fotossíntese, devido à melhor arquitetura das plantas supridas com uma grande quantidade de Si (RAVEN, 1983).

Observações ultraestruturais sugerem que a silicificação das paredes celulares pode reduzir a troca de material entre patógeno e hospedeiro, reduzindo a senescência prematura, além de agir como barreira física, caso o fungo alcance a parede celular. Assim, o Si agiria de modo semelhante à lignina ou suberina de algumas plantas, que são depositadas em paredes primárias, ligando-se aos polissacarídeos, para bloquear o

avanço do patógeno (FOSKET, 1994).

Altos níveis de Si nos locais de contato de *E. graminis* com o tecido foliar de cevada estão associados ao fracasso da penetração do fungo. A acumulação de Si no tecido hospedeiro, nas regiões de contato com o parasita, é localizada e crescente (CARVER et al., 1987). Aparentemente, o Si aplicado via foliar pode ser absorvido e translocado lateralmente, através da folha, para áreas não cobertas pelo silicato, circundando o apressório. Mas é necessário um suprimento contínuo de Si para o aumento da resistência da planta. Pepineiros infectados com *S. fuliginea*, transferidos para um meio contendo Si, apresentam uma rápida silicificação do tecido foliar, principalmente nas bases dos tricomas, e ao redor dos pontos de infecção, aumentando a resistência ao patógeno. Mas a transferência de plantas suplementadas com Si para um meio deficiente no elemento não mantém a resistência ao fungo ou à silicificação do tecido hospedeiro ao redor da hifa, apesar da existência de Si residual na base dos tricomas (SAMUELS et al., 1991).

Entretanto, a barreira física proporcionada pelo Si nas células epidérmicas não é o único mecanismo de combate à penetração das hifas de fungos ou ataque de insetos. Resultados recentes de pesquisa sugerem que, em plantas de pepino, o Si age no tecido hospedeiro afetando os sinais entre o hospedeiro e o patógeno, resultando em uma ativação mais rápida e extensiva dos mecanismos de defesa da planta (SAMUELS et al., 1991; CHÉRIF et al., 1994).

Compostos fenólicos e Si acumulam-se nos sítios de infecção, cuja causa ainda não está esclarecida. O Si pode formar complexos com os compostos fenólicos e elevar a síntese e mobilidade destes no apoplasto. Uma rápida deposição de compostos fenólicos ou lignina nos sítios de infecção é um mecanismo de defesa contra o ataque de patógenos, e a presença de Si solúvel facilita este mecanismo de resistência. Pepineiros suplementados com 100 mg kg⁻¹ de Si na solução nutritiva apresentam uma acentuada acumulação de material eletrodenso no tecido hospedeiro infectado por *P. ultimum*, com um aumento significativo de células preenchidas com este material. O fungo colonizador é bastante danificado, frequentemente reduzido a hifas vazias. O material eletrodenso, provavelmente fenóis, também forma camadas ao longo das paredes primárias e secundárias das células e vasos do xilema (CHÉRIF et al., 1992).

Koga et al. (1988) estabeleceram uma hipótese relativa ao mecanismo de defesa das plantas, por meio do Si e compostos fenólicos. Segundo os autores, estes compostos são liberados pela descompartimentação que se segue após a morte da célula, acumulando-se nas paredes das células mortas. Os compostos fenólicos formam complexos insolúveis com o Si, que se movem apoplasticamente na epiderme, devido ao transporte passivo no fluxo da transpiração.

Em cafeeiro observou-se redução da cercosporiose com aplicação de Si no substrato para mudas de saquinhas e em tubetes. Santos (2002), adicionando ao substrato silicato de cálcio e silicato sódico, constatou decréscimo linear na incidência de severidade, avaliadas pelas áreas abaixo da curva de progresso do número de plantas doentes e do total de lesões, além de aumento na concentração de lignina nas folhas até a dose de 0,52 g de Si. Também Pozza et al. (2004) estudaram o efeito do Si na intensidade da cercosporiose em três cultivares de cafeeiro (Catuaí, Mundo Novo e Icatu) em

tubetes, e observaram redução de 63,2% no número de lesões e de 43% de folhas doentes por plantas na cultivar Catuaí.

Existe uma relação direta bastante significativa entre a intensidade da luz e o conteúdo de fenóis em folhas (MARSCHNER, 1995). Portanto, alguns mecanismos de defesa da planta, como aqueles baseados no metabolismo dos compostos fenólicos, ficam enfraquecidos no período noturno. Pode-se aventar a possibilidade do aumento da capacidade destes mecanismos no escuro, quando a planta é suprida com quantidades elevadas de Si. Carver et al. (1994) observaram que, na presença de luz contínua, ocorre um atraso na formação do haustório de *E. graminis* f. sp. *avenae* em folhas de aveia. Trinta horas após a inoculação, em ausência constante de luz, o conteúdo de Si das paredes celulares do hospedeiro é substancialmente aumentado, diminuindo a penetração do fungo nas células tratadas. O mesmo efeito não foi observado no tratamento com luz.

Compostos fenólicos extraídos de pepineiros infectados por *P. ultimum* e *P. aphanidermatum* e tratados com Si apresentam alta atividade fungistática, com uma ativação rápida e intensa de peroxidases e polifenoloxidasas, bem como uma marcante estimulação da atividade da quitinase, após a infecção com *Pythium* sp. Peroxidases e polifenoloxidasas geralmente estão associadas ao rompimento de células da própria planta, ao passo que a quitinase está relacionada com a degradação da parede celular do fungo. Além disso, os extratos protéicos de plantas infectadas, e com níveis elevados de Si, apresentam um aumento na atividade da enzima beta-glicosidase, a qual apresenta correlação com a presença de agliconas fungitóxicas encontradas nas raízes das plantas, e com a eficácia destas em suprimir o *Pythium* sp. (CHÉRIF et al., 1994). Folhas de pepineiros com teor alto de Si apresentam um aumento significativo na atividade de RuBP carboxilase, e maior teor de proteína solúvel (ADATIA; BESFORD, 1986). Em arroz, o fornecimento adicional de Si pode induzir um aumento na celulose, hemicelulose, proteína total e fenóis (HOODA; SRIVASTAVA, 1996).

A utilização de elicitores bióticos e abióticos na agricultura, com a finalidade de ativar os mecanismos de defesa da planta, desperta bastante interesse. Alguns componentes fúngicos, e de vegetais específicos, podem ser utilizados como elicitores bióticos (FOSKET, 1994). Mas a indução da resistência por meio destes compostos, antes de ocorrer a infecção, desvia o metabolismo energético de seu padrão normal, podendo resultar em perdas na produção. Em contrapartida, a fertilização com Si parece induzir o mecanismo de defesa somente em resposta ao ataque do patógeno. Esta indução é expressa por meio de uma reação em cadeia de várias mudanças bioquímicas associadas, caracterizando uma resposta de defesa rápida e prolongada. Esta característica explica a não-especificidade da resistência induzida pelo Si, em vários patógenos não relacionados entre si (CHÉRIF et al., 1994).

Considerações Finais

Apesar de os fisiologistas não considerarem o Si como um elemento essencial para as plantas, os trabalhos mostram claramente que a adubação com Si leva à redução do ataque de doenças e pragas nas culturas, aumento da produtividade por meio

das alterações na nutrição do hospedeiro e melhora a propriedade química do solo. Portanto, o Si pode ser considerado como um elemento benéfico ou útil. O Si apresenta um potencial comercial elevado como produto natural alternativo para redução de doenças e pragas. Cabe à pesquisa indicar e propor maneiras de esta tecnologia ser aplicada com sucesso em condições comerciais.

Referências

ADATIA, M. H.; BESFORD, R. T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany**, London, v. 58, n. 3, p. 343-351, Sept. 1986.

AHMAD, R.; ZAHEER, S. H.; ISMAIL, S. Role of silicon in salt of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant science**, Limerick, v. 85, n.1, p. 43-50, 1992.

ALCOFORADO, P.A.U.G. **Aspectos do Silício no sistema solo-planta**: UFLA, 1996. 53p. (datilografado).

ALVES, S. B. **Controle microbiano de insetos**. Piracicaba: FEALQ, 1998. 1163 p.

AYRES, A. S. Calcium silicate slag as grown stimulant for sugarcane on low-silicon soils. **Soils Science**, Baltimore, v. 101, n. 3, p. 216-227, Sept. 1966.

BÉLANGER, R.R.; BENHAMOU, N.; MENZIES, J.G. Mineral nutrition in the management of plant diseases. **Phytopathology** 93(4):402-12. 2003.

BÉLANGER, R.R.; MENZIES, J.G. **How does silicion protec plants againt disease? Dogma versus new hypothesis**, in: 42 Congresso Brasileiro de Olericultura, Uberlândia, CD-ROOM. 2002.

CARVER, T.L.W., INGERSON-MORRIS, S.M., THOMAS, B.J.; GAY, A.P. Light-mediated delay of primary haustorium formation by *Erysiphe graminis* f. sp. *avenae*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 45, n. 1, p. 59-79, 1994.

CARVER, T.L.W.; ZEYEN, R.J.; AHLSTRAND, G.G. The relationship between insoluble silicon and success of attempted primary penetration by powdery mildew (*Erysiphe graminis*) germlins on barley. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 31, n. 1, p. 133-148, 1987.

CHEN, C. H.; LEWIN, J. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. **Canadian Journal of Botany**, v. 47, p. 125-131, 1969.

CHÉRIF, A.; ASSELIN, A.; BÉLANGER, R.R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. **Phytopathology**, v. 84, p. 236-242, 1994.

CHÉRIF, M. Silicon induced resistance in cucumber plants against *Pythium ultimum*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, London, v.41, p.411-425, 1992.

DATNOFF, L.E.; DEREN, C.W.; SNYDER, G.H. 1997. Silicion fertilization for disease management of rice in Florida. **Crop Prot.** 16(6):525-31 1997.

DÉLANO-FRIER, J. P. The effect of exogenous jasmonic acid on induced resistance and productivity in amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) is influenced by environmental conditions. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 30, n. 5, p. 1001-1034, Maio, 2004.

DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on Everglades Histosols. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, n. 11, p. 2273-2280, 1993.

DEREN, L.W.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. **Variable silicon content of rice cultivars grown on Everglades Histosols.** **Journal of Plant Nutrition**, v. 15, p. 2.363-2.368, 1992.

EPSTEIN, E. Photosynthesis, inorganic plant nutrition, solutions, and problems. **Photosynthesis Research**, v. 46, p. 37-39, 1995.

EPSTEIN, E. Silicon in plants: facts vs concepts, in: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (eds.). **Silicon in agriculture.** The Netherlands: Elsevier Science, 2001. 403 p.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings National of Academy Science**, v. 91, p. 11-17, 1994.

EXLEY, C. Silicon in life: a bioinorganic solution to bioorganic essentiality. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 69, n. 3, p. 139-144, Feb. 1998.

FAWE, A.; MENZIES, J.G.; CHÉRIF, M.; BÉLANGER, R.R. Silicon and disease resistance in dicotyledons, in: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (eds.). **Silicon in agriculture.** The Netherlands: Elsevier Science, 2001. 403 p.

FENG, M. J. 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.

FOSKET, D.E. **Plant growth and development; a molecular approach.** San Diego: Academic Press, 1994. 580p.

GASCHO, G.J. Silicion sources for agriculture. In: Datnoff, L.E.; snyder, G.H.; Korndörfer, G.H. (ed.). **Silicon in Agriculture.** Elsevier Science B.V. Amsterdam, p. 197-208, 2001.

GOUSSAIN, M.M. Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 305-310, 2002.

GROTHGE-LIMA, M.T. **Interrelação cancro da haste (*Diaporthe phaseolorum* f. sp. *meridionalis*), nodulação (*Bradyrhizobium japonicum*) e silício em soja [*Glycine max* (L.) Merrill]**. Piracicaba, 1998. 58p. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.

HAHLBROCK, K.; SCHEEL, D. Physiology and molecular biology of phenylpropanoid metabolism. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 40, p. 347-369, 1989.

HOODA, K.S.; SRIVASTAVA, M.P. Role of silicon in the management of rice blast. **Indian Phytopathology**, v. 49, n. 1, p. 26-31, 1996.

JONES, L.H.P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plant and animals. **Advances in Agronomy**, v. 19, p. 107-149, 1967.

KEEPING, M. G.; MEYER, J. H. **Increased resistance of sugarcane to *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae) with calcium silicate application**. Proceedings of the Annual Congress South African Sugar Technologists Association, n. 74, p. 221-222, 2000.

KOGA, H.; ZEYEN, R.J.; BUSHNELL, W.R.; AHLSTRAND, G.G. Hipersensitive cell death, autofluorescence and insoluble silicon accumulation in barley leaf epidermal cells under attack by *Erysiphe graminis* f. sp. *hordei*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 32, n. 3, p. 395-409, 1988.

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

KORNDÖRFER, G. H.; GASCHO, G. J. **Avaliação de fontes de silício para arroz**, in: I Congresso Nacional de Arroz Irrigado, Pelotas, p. 313-6. 1999.

KORNDÖRFER, G.H. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício no solo e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 635- 641, 1999.

LOUSADA, P. T. C. **Eficiência de uma escória de siderurgia como corretivo e fertilizante do solo**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1987.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica

Ceres. 251 p. 1980.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of higher plants**. New York: Academic Press, 887p. 1995.

MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 31, p. 625-636, 1985.

POZZA, A.A.A.; ALVES, E.; POZZA, E.A.; CARVALHO, J.G.; MONTANARI, M.; GUIMARÃES, P.T.G.; SANTOS, D.M. Efeito do silício no controle da cercosporiose em três variedades de cafeeiro. **Fitopatologia Brasileira**, 29(2)185-8. 2004.

RAIJ, B.van; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, v. 32, p. 223-231, 1973.

RAVEN, J.A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society**, v. 58, p. 179- 207, 1983.

SAMUELS, A.L.; GLASS, A.D.M.; EHRET, D.L.; MENZIES, J.G. Mobility and deposition of silicon in cucumber plants. **Plant, Cell and Environment**, v. 14, p. 485-492, 1991.

SANTOS, D.M. dos. **Efeito do silício na intensidade da cercosporiose (*Cercospora coffeicola* Berk.; Cooke) em mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. Lavras, UFLA. Tese de Mestrado, 2002.

SAVANT, N.K.; SNYDER, G. H., DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**. v. 58, p. 151-199, 1997.