

O SILÍCIO NA AGRICULTURA

Oscar Fontão de Lima Filho¹
Maria Therese Grothge de Lima¹
Siu Mui Tsai¹

INTRODUÇÃO

O silício é um elemento com propriedades elétricas e físicas de um semimetálico, desempenhando no reino mineral um papel cuja importância pode ser comparável ao do carbono nos reinos vegetal e animal. Semelhante a este, porém de modo menos intenso, o Si possui a capacidade de formar longas cadeias, muitas vezes ramificadas.

A palavra silício provém do latim *silex*, rocha constituída de sílica (dióxido de silício) amorfa hidratada e sílica microcristalina, a qual era utilizada, pela sua dureza, na confecção de utensílios e armas na Era Pré-Metálica (Paleolítica).

O Si é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, 27% em massa, superado apenas pelo oxigênio. É encontrado somente em formas combinadas, como a sílica e minerais silicatados. Cerca de 80% dos minerais das rochas ígneas e metamórficas são silicatos, enquanto em rochas sedimentárias o conteúdo é menor (JACKSON, 1964). Os silicatos são sais nos quais a sílica é combinada com oxigênio e outros elementos, como Al, Mg, Ca, Na, Fe, K e outros, em mais de 95% das rochas terrestres (cerca de 87% em massa), meteoritos, em todas as águas, atmosfera (pó silicoso), vegetais e animais.

Sua presença no sol e em outras estrelas também é indicada por espectroscopia. Os minerais silicatados mais comuns são o quartzo, os feldspatos alcalinos e os plagioclásios. Os dois últimos são aluminossilicatos, contribuindo significativamente com o conteúdo de Al na crosta. Todos estes minerais sofrem o processo de intemperização, cuja taxa depende de uma série de fatores, incluindo temperatura, pH, composição iônica do solvente, etc. O quartzo é relativamente estável, intemperizando-se muito lentamente. Portanto, não é considerado uma fonte disponível de ácido silícico. Os feldspatos, por sua vez, intemperizam-se mais rapidamente, resultando em argilas (caulinita ou montmorilonita) e ácido silícico (EXLEY, 1998). A composição isotópica, constante tanto na crosta terrestre como em meteoritos, é a seguinte: ²⁸Si - 92,28%, ²⁹Si - 4,67%, ³⁰Si - 3,05%.

O CICLO DO SILÍCIO

O ácido monossilícico [(H₄SiO₄ ou Si(OH)₄], também denominado de ácido ortossilícico ou simplesmente ácido silícico,

ocorre na solução do solo, nas águas doces e oceanos de todo o mundo. Em pH próximo da neutralidade, o ácido silícico tem solubilidade de 2mM. Acima desta concentração ocorre policondensação, produzindo ácido silícico oligomérico e, eventualmente, partículas coloidais de sílica hidratada

(SiO₂.xH₂O). A dissolução e deposição de sílica em água pode ser representada como: (SiO₂)_x + 2H₂O ⇌ (SiO₂)_{x-1} + Si(OH)₄. A reação para a direita ocorre em condições de hidratação, e para a esquerda em condições de desidratação (BIRCHALL, 1995).

Da mesma maneira como ocorre com o P, Ca e Mg, o ciclo do Si possui um elevado dreno abiótico, impedindo uma alta abundância na biosfera. Um dos drenos abióticos no solo é a reação do ácido silícico com o Al, formando hidroxialuminossilicatos (HAS). Os HAS podem ser considerados como precursores amorfos da imogolita, um aluminossilicato mineral encontrado em diferentes tipos de solos. A condensação de ácido silícico e a polimerização subsequente, formando a sílica biogênica, representa uma perda elevada de ácido silícico da biosfera. O surgimento e o aumento de organismos formadores de sílica têm contribuído com uma redução significativa na concentração de ácido silícico no meio ambiente, pois a reação reversa é ordens de magnitude menor (EXLEY, 1998).

Estas perdas substanciais do ácido silícico biosférico, para os drenos bióticos e abióticos, podem ser compensadas pela natureza, de modo global, por meio de sua abundância na crosta terrestre. Entretanto, em ecossistemas específicos, o problema da diminuição do Si pode se tornar economicamente importante. Solos utilizados intensivamente, principalmente com culturas acumuladoras de Si, podem tornar-se paulatinamente deficientes no elemento, pois a exportação do Si não é compensada, via de regra, com a fertilização silicatada.

A Figura 1 mostra, resumidamente, o ciclo biogeoquímico do Si. Este ciclo inclui os processos que ligam fontes e drenos do ácido silícico, o qual é o único precursor conhecido na produção e deposição de Si na biota (EXLEY, 1998). A fração sedimentar do ciclo inclui o material acumulado, cuja dissolução ocorre lentamente. O ciclo do Si, na realidade, é duplo, compreendendo os ciclos terrestre e marinho. O ciclo terrestre, que inclui as águas doces, alimenta o ciclo marinho. Os rios, contendo um valor médio de 0,15 mM de Si, contribuem com cerca de 80% do Si dissolvido que flui para os oceanos, totalizando 6,1 ± 2 x 10¹² moles por ano (TRÉGUER et al., 1995). Uma parte deste Si é utilizada por organismos marinhos, como diatomáceas, radiolárias e silicoflagelados, na construção de exoesqueletos.

¹ Pesquisador, Centro de Energia Nuclear na Agricultura-CENA/USP. Av. Centenário, 303. Caixa Postal 96. CEP 13400-970 Piracicaba-SP.

efeitos semelhantes. O metassilicato de potássio é utilizado na Europa, principalmente por produtores de pepino e roseiras, para o controle de míldio por meio de pulverização foliar (BÉLANGER et al., 1995). Comercialmente, as escórias básicas de siderurgia, que são silicatos de Ca e Mg, além de poderem ser utilizadas como corretivos do solo devido à sua basicidade, são fontes de Si. Os termofosfatos magnesianos (silicofosfatos de magnésio) também caracterizam-se como fontes de Si. A Tabela 1 apresenta os teores médios de Si em algumas escórias brasileiras. Apesar do menor teor nas escórias de aciaria, a liberação do Si é maior, por conter maior proporção de sílica amorfa.

Tabela 1. Teor de Si em algumas escórias agrícolas de aciaria e alto forno¹.

Tipo de escória	Origem	SiO ₂ %
Alto forno	Manesmann/Belo Horizonte	40-42
Alto forno	Acesita/Ouro Branco	38-40
Alto forno	CST/Vitória	36-38
Aciaria	Manesmann/Belo Horizonte	16-22
Aciaria	Acesita/Ouro Branco	12-16
Aciaria	CST/Vitória	16-18

¹ PIAU (1999), comunicação pessoal.

A produtividade da cana-de-açúcar e a síntese de açúcar podem aumentar significativamente devido à aplicação de silicatos de cálcio na forma de escória. As maiores respostas são obtidas no primeiro ano após a aplicação da escória, quando aumenta a absorção de Si pela planta (ANDERSON, 1991; RAID et al., 1992). O mesmo ocorre com a cultura do arroz. Isso sem levar em consideração o aumento da resistência destas culturas a várias doenças e pragas, pelo incremento no teor de Si nos tecidos da planta.

O SILÍCIO NAS PLANTAS

• Essencialidade

A relação entre a absorção do Si e o crescimento vegetal foi investigado pela primeira vez há mais de 100 anos. O Si é um nutriente em diatomáceas, que o absorvem ativamente, provavelmente através do cotransporte com o Na. A falta de Si afeta negativamente a síntese de DNA e de clorofila nestes organismos (WERNER, 1977; RAVEN, 1983). É essencial, também, para radiolárias e coanoflagelados. Confirmou-se a essencialidade do Si também para os animais, quando ratos e pintos apresentaram redução de peso e mudanças patológicas na formação e nas estruturas de tecidos conectivos colaginosos e dos ossos. A deficiência de Si afetou a osteogênese em ratos (SCHWARZ & MILNE, 1972), e a síntese de tecidos conectivos em pintos (CARLISLE, 1972). A essencialidade do Si para as plantas superiores, porém, foi demonstrada apenas para algumas espécies, apesar de ser um constituinte majoritário dos vegetais (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995). 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 purificados (WERNER & ROTH, 1983). Apesar disso, o fornecimento de Si é benéfico para muitas espécies vegetais e, em determinadas circunstâncias, para a maioria das plantas superiores (MARSCHNER, 1995). O Si pode estimular o crescimento e a produção vegetal através de várias ações indiretas, como a diminuição do auto-sombreamento, deixando as folhas mais eretas; decréscimo na suscetibilidade ao acamamento, maior rigidez estrutural dos tecidos; proteção contra estresses abióticos, como a redução da toxidez de Al, Mn, Fe e Na; diminuição na incidência de patógenos e aumento na proteção contra herbívoros, incluindo os insetos fitófagos (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995).

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 (TAKAHASHI, 1995).

Constatou-se, em plantas de arroz, que a suplementação de Si proporciona um aumento na produção e na massa individual das sementes, diminuição da esterilidade e do teor de Mn, e maior taxa fotossintética (MATOH et al., 1991; PERSHIN et al., 1995). A deficiência de Si em soja causa sintomas característicos, como a malformação de folhas novas e redução da fertilidade do grão de pólen (MIYAKE & TAKAHASHI, 1985).

Com o suprimento de Si na cultura de arroz, a diferença no comprimento das lâminas foliares, principal fator responsável pela altura, tende a aumentar de acordo com o desenvolvimento das plantas. A maior expansão foliar determina maior taxa de assimilação de CO₂ por planta. Com isso, há uma maior translocação de assimilados para a produção de grãos, aumentando a produtividade. A contribuição do Si para a planta de arroz pode ser visualizada através da Figura 3. O grau de expressão do Si, nos processos relacionados no fluxograma, está relacionado com o nível de nitrogênio. O efeito do Si tende a ser mais intenso em cultivos com adubações nitrogenadas pesadas (TAKAHASHI, 1995).

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, o teor de Si pode igualar ou exceder aquele do N (EPSTEIN, 1995; RAFI et al., 1997). Em média, estima-se que para produzir 5 toneladas de grãos, a cultura do arroz remove de 500 a 1.000 kg de SiO₂ por hectare. Culturas acumuladoras de Si, principalmente, beneficiam-se da adubação com este elemento, particularmente em solos altamente intemperizados e dessilicatados, aumentando ou mantendo elevadas produtividades. 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

Solos tropicais e subtropicais sujeitos à intemperização e lixiviação, com cultivos sucessivos, tendem a apresentar baixos níveis de Si trocável, devido à dessilicificação.

Em média, estima-se que para produzir 5 toneladas de grãos, a cultura do arroz remove de 500 a 1.000 kg de SiO₂ por hectare.

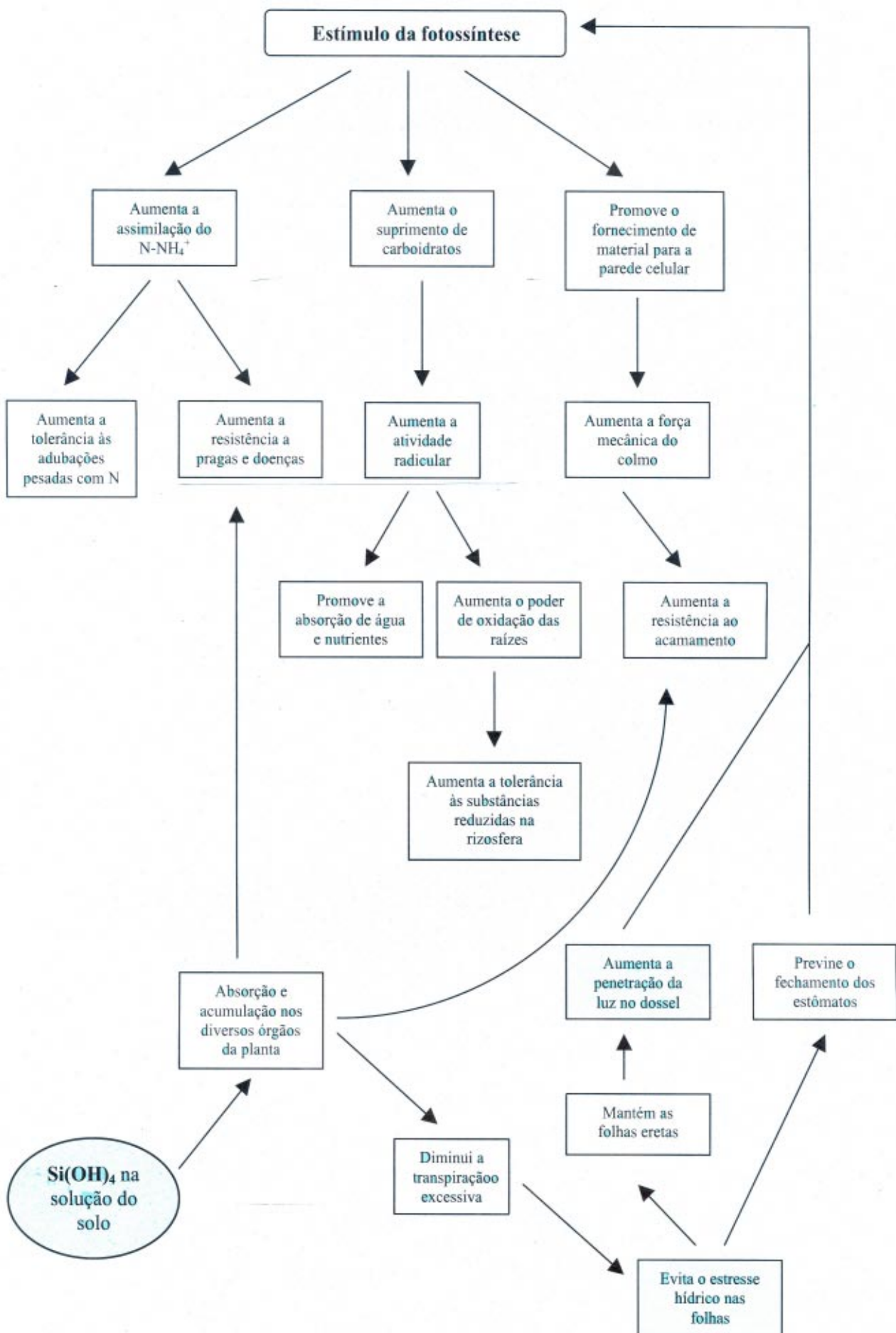


Figura 3. Papel fisiológico do Si em arroz (TAKAHASHI, 1995).

crescimento e na produção, interações positivas com fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, aumento na resistência a estresses bióticos (doenças e pragas) e abióticos (seca, salinidade, acamamento) 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., 1997b).

Os conceitos de essencialidade estabelecidos por ARNON & STOUT (1939) são, até hoje, considerados válidos e inteiramente satisfatórios: I) a deficiência do elemento torna impossível para a planta completar a fase vegetativa ou reprodutiva do seu ciclo de vida; II) a deficiência do elemento é específica, sendo impedida ou corrigida com o fornecimento deste elemento; III) o elemento está diretamente relacionado com a nutrição da planta, não levando em conta os possíveis efeitos na correção de quaisquer condições químicas ou microbiológicas do solo, ou outro meio de cultura. Estes critérios, porém, esbarram nos avanços da microquímica, com técnicas cada vez mais refinadas na remoção de contaminantes dos sais nutrientes, e na própria natureza destes conceitos de essencialidade, que são rígidos (EPSTEIN, 1995).

De acordo com EPSTEIN (1994, 1995), o uso de soluções nutritivas convencionais, ou seja, sem adição de Si ao meio nutriente, pode tornar as plantas “artefatos experimentais”, ou seja, produtos vegetais artificiais. O Si está envolvido em inúmeras características físicas das plantas, e envolvido em uma série de eventos fisiológicos, favorecendo a fotossíntese. A falta do Si pode, portanto, resultar em diminuição da capacidade biológica da planta em resistir às condições adversas do meio ambiente (RAFI et al., 1997).

Quando são realizados experimentos com o objetivo de selecionar genótipos tolerantes a estresses abióticos, como aqueles relacionados ao complexo de acidez do solo (excesso de Al e Mn), ou à salinidade, com altas concentrações de sais de Na, normalmente o Si não é incluído na formulação das soluções nutritivas usadas em pesquisas de estresses minerais. Todavia, evidências experimentais indicam que o Si deve fazer parte destas soluções. Plantas selecionadas em condições hidropônicas serão posteriormente cultivadas em solo, com Si disponível. Conseqüentemente, a resposta destas plantas ao estresse, em condições de campo, pode ser diferente daquela observada em condições no qual o meio nutriente é deficiente em Si. O Si é normalmente incluído na formulação das soluções nutritivas na Universidade da Califórnia, desde 1988. A concentração utilizada de Si é de 0,5 mmol L⁻¹, na forma de Na₂SiO₃ (EPSTEIN, 1994; 1995).

Os trabalhos de pesquisa que se propõem a demonstrar a essencialidade do Si, tanto em animais como em plantas, falham em descrever o mecanismo de ação deste elemento. No entanto, a diminuição na resistência a fatores estressantes, bióticos ou abióticos, poderá ocorrer quando a concentração do ácido silícico estiver abaixo de um limite crítico. Nestas condições, se as mudanças bioquímicas que se manifestam em uma planta são danosas a ela, então pode-se definir a essencialidade do Si (EXLEY, 1998).

AQUISIÇÃO DE SILÍCIO PELAS PLANTAS

As plantas diferem bastante na sua capacidade de absorver o Si. Até mesmo genótipos de uma espécie podem apresentar con-

centrações de Si que variam por um fator superior a três, como demonstrado para cevada (NABLE et al., 1990). LANNING (1960) encontrou diferenças marcantes no teor de Si, nos diferentes órgãos, entre cultivares de morangueiros. Genótipos de arroz diferem no teor de Si, respondendo de modo distinto à aplicação do elemento (WINSLOW, 1992; DEREN et al., 1992). GROTHGELIMA (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 & MIYAKE (1977) distinguiram-nas em acumuladoras de Si – a absorção de Si excedendo a absorção de água, e não acumuladoras – a absorção de Si sendo similar ou menor do que a absorção de água. Em arroz, genes aditivos e não aditivos parecem estar envolvidos no mecanismo de absorção do silício (MAJUMDER et al., 1985).

Posteriormente, MIYAKE & TAKAHASHI (1985) caracterizaram as plantas em três tipos, quanto à absorção de Si:

- Acumuladoras, com um teor bastante elevado de Si, sendo a absorção ligada à respiração aeróbica. O arroz e a cana-de-açúcar são exemplos típicos deste grupo de plantas;
- 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;
- 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.

A soja transporta o Si para a parte aérea até um determinado limite. No cultivar Garimpo Comum, em plantas com cerca de 40 dias após a germinação, as folhas e hastes chegaram a um limite em torno de 4.500 e 650 mg kg⁻¹ de Si, respectivamente. As raízes, por outro lado, acumularam quantidades proporcionalmente crescentes de Si, conforme se aumentou o nível do elemento no meio. A partir da adição de 30 mg kg⁻¹ de Si ao meio nutriente, a taxa de acumulação do elemento no órgão subterrâneo foi superior a dos demais órgãos da planta. Este mecanismo de acumulação radicular contribui para controlar e manter estável os níveis elevados de Si na parte aérea da soja (Figura 4).

INTERAÇÃO SILÍCIO X ALUMÍNIO

Estudos recentes mostram que, em animais e seres humanos, o ácido silícico interage com espécies aquosas de Al para formar HAS (hidroxialuminossilicatos), que podem ter baixa biodisponibilidade e toxicidade. Na presença de ácido silícico, a absorção gastrointestinal do Al é bastante reduzida, aumentando-se a excreção através dos rins (BIRCHALL et al., 1996). Devido a isto, o Si pode ter um papel protetor contra a acumulação e subseqüente toxidez do Al, em pacientes que se submetem à hemodiálise (PARRY et al., 1998). A acumulação de Al nos tecidos, particularmente no cérebro, está relacionado com um maior risco de se contrair a doença de Alzheimer. O Si, ao impedir a absorção

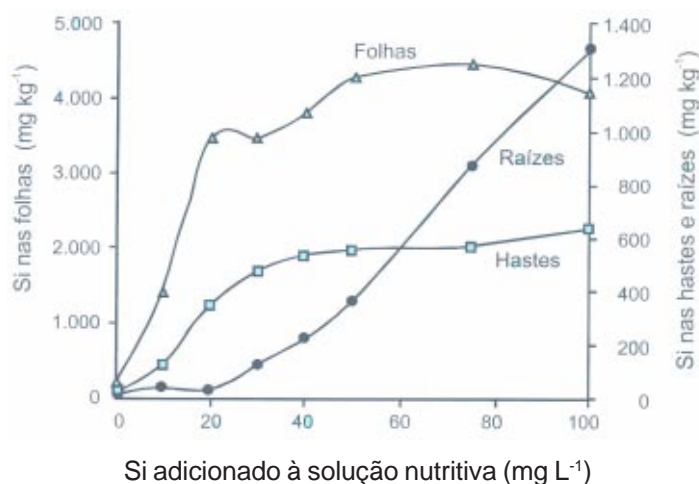


Figura 4. Teor de Si em plantas de soja (cv. Garimpo Comum) em função do nível de Si adicionado à solução nutritiva (média de oito repetições por ponto) (GROTHGE-LIMA, 1998).

gastrointestinal do Al, protege o organismo contra os efeitos neurotóxicos que podem ser causados pelo Al (BELLES et al., 1998). Níveis baixos de Si na água (0,1 mM) também podem proteger os peixes da toxidez provocada pelo Al (BIRCHALL et al., 1989; EXLEY et al., 1991).

Em plantas, o efeito do Si na diminuição dos efeitos tóxicos do Al ocorre devido à sua menor absorção por elas. Alguns autores afirmam que a atenuação da toxidez de Al, induzida pelo Si, pode ser devido ao aumento do pH, e não a um efeito direto do Si em solução (GALVEZ et al., 1987; LI et al., 1996). Vários trabalhos, entretanto, demonstram que o Si solúvel pode formar compostos inertes com o Al na solução do solo. BAYLIS et al. (1994) observaram que os efeitos benéficos do Si foram independentes dos efeitos do metassilicato de sódio sobre o pH. Outros trabalhos dão suporte à hipótese de que a interação Si-Al no tecido vegetal tem um papel significativo na diminuição da toxicidade do Al (HODSON & WILKINS, 1991; HODSON & SANGSTER, 1993; CORRALES et al., 1997).

Estudos histológicos mostram que genótipos tolerantes ao Al possuem menor capacidade de troca catiônica, e tendem a acumular menos Al em suas raízes do que genótipos de baixa tolerância. Esta característica permite que a acumulação de Al em plantas possa ser visualmente perceptível pelo método que utiliza o corante hematoxilina. Quando raízes são tratadas com soluções contendo Al e, posteriormente, coradas em uma solução aquosa contendo hematoxilina, ocorre um tingimento gradual do tecido radicular em função da menor tolerância das plantas ao Al (POLLE et al., 1978). Esta técnica permitiu a CORRALES et al. (1997) evidenciar a indução da tolerância ao Al pelo Si. Ápices radiculares de plântulas de milho foram pré-tratadas sem Si ou com 1 mM de Si por 72 horas, e então expostas por 24 horas em soluções sem Si contendo 50 µM de Al. As plântulas do tratamento sem adição de Si apresentaram coloração intensa. A não coloração dos ápices radiculares das plantas pré-tratadas com Si comprovou a indução da tolerância ao Al pelo Si.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

São poucos os trabalhos com Si, muitas vezes subestimando-se o significado deste elemento dentro da biologia vegetal. É importante o incentivo a pesquisas relacionadas, por exemplo,

com a eficiência de fontes e sua utilização, levantamentos nutricionais, principalmente de regiões arrozeiras e canavieiras, caracterização dos cultivares das diversas espécies quanto ao tipo de absorção do Si, interações nutricionais, além da inclusão do Si nas formulações das soluções nutritivas, especialmente em ensaios de tolerância a estresses nutricionais. Além disso, são relevantes os estudos envolvendo a relação entre a nutrição mineral e as doenças e pragas das diversas culturas, particularmente no caso do Si.

LITERATURA CITADA

- ADATIA, M.H.; BESFORD, R.T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany**, v.58, p.343-351, 1986.
- ANDERSON, D.L. Soil and leaf nutrient interaction following application of calcium silicate slag to sugarcane. **Fertilizer Research**, v.30, p.9-18, 1991.
- 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, p.371-375, 1939.
- BAYLIS, A.D.; GRAGOPONLON, C.; DAVIDSON, K.J. Effects of silicon on the toxicity of aluminium to soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.25, p.537-546, 1994.
- BÉLANGER, R.R.; BOWEN, P.A.; EHRET, D.L.; MENZIES, J.G. Soluble silicon – its role in crop and disease management of greenhouse crops. **Plant Disease**, v.79, n.4, 1995.
- BELLES, M.; SANCHES, D.J.; GOMES, M.; CORBIELLA, J.; DOMINGO, J.L. Silicon reduces aluminum accumulation in rats: relevance to the aluminum hypothesis of alzheimer disease. **Alzheimer Disease and Associated Disorders**, v.12, n.2, p.83-87, 1998.
- BIRCHALL, J.D. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, v.24, p.351-357, 1995.
- BIRCHALL, J.D.; BELLIA, J.P.; ROBERTS, N.B. On the mechanisms underlying the essentiality of silicon – interactions with aluminium and copper. **Coordination Chemistry Reviews**, v.149, p.231-240, 1996.
- BIRCHALL, J.D.; EXLEY, C.; CHAPPEL, J.S.; PHILLIPS, M.J. Acute toxicity to fish eliminated in silicon-rich acid waters. **Nature**, n.338, p.146-148, 1989.
- BRADY, N.C. **The nature and properties of soil**. 10.ed. New York: Macmillan Publishing, 1992.
- CARLISLE, E.M. Silicon as an essential element for the chick. **Science**, n.178, p.619-621, 1972.
- CHEN, C.H.; LEWIN, J. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. **Canadian Journal of Botany**, v.47, p.125-131, 1969.
- CORRALES, I.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Influence of silicon pretreatment on aluminium toxicity in maize roots. **Plant and Soil**, v. 190, p.203-209, 1997.
- 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. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America**, v.91, p.11-17, 1994.
- EXLEY, C. Silicon in life: a bioinorganic solution to bioorganic essentiality. **Journal of Inorganic Biochemistry**, v.69, p.139-144, 1998.
- EXLEY, C.; CHAPPELL, J.S.; BIRCHALL, J.D.A. A mechanism for acute aluminium toxicity in fish. **Journal of Theoretical Biology**, v.151, p.417-428, 1991.
- FRIESEN, D.K.; SANZ, J.I.; CORREA, F.J.; WINSLOW, M.D.; OKADA, K.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. Silicon deficiency of upland rice on highly weathered savanna soils in Colombia. I. Evidence of a major yield constraint. In: CONFÉRENCIA INTERNACIONAL DE ARROZ PARA A AMÉRICA LATINA E PARA O CARIBE, 9., Goiânia, 1994.
- GALVEZ, L.; CLARK, R.B.; GOURLEY, L.M.; MARANVILLE, J.W. Silicon interactions with manganese and aluminum toxicity in sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, v.10, p.1139-1147, 1987.
- 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.
- HODSON, M.J.; SANGSTER, A.G. The interaction between silicon and aluminium in *Sorghum bicolor* (L.) Moench: growth analysis and x-ray microanalysis. **Annals of Botany**, v.72, p.389-400, 1993.
- HODSON, M.J.; WILKINS, D.A. Localization of aluminium in the roots of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] inoculated with *Paxillus involutus* Fr. **New Phytologist**, v.118, p.273-278, 1991.
- JACKSON, M.L. Chemical composition of soils. In: BEAR, S.E. (ed.). **Chemistry of the soil**. 2.ed. New York: Reinhold, 1964. p.71-141.
- LANNING, F.C. Nature and distribution of silica in strawberry plants. **Journal of American Society for Horticultural Science**, v.76, p.349-358, 1960.
- LI, Y.C.; SUMMER, M.E.; MILLER, W.P.; ALVA, A.K. Mechanism of silicon induced alleviation of aluminum phytotoxicity. **Journal of Plant Nutrition**, v.19, p.1075-1087, 1996.
- MAJUNDER, N.D.; RAKSHIT, S.C.; BORTHAKUR, D.N. Genetics of silica uptake in selected genotypes of rice (*O. sativa* L.). **Plant Soil**, v.88, p.449-453, 1985.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. New York: Academic Press, 1995. 887p.
- MATOH, T.; MURATA, S.; TAKAHASHI, E. Effect of silicate application on photosynthesis of rice plants. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.63, n.3, p.248-251, 1991.
- MATYCHENKOV, V.V.; PINSKLY, D.L.; BOCHARNIKOVA, Y.A. Influence of mechanical compaction of soils on the state and form of available silicon. **Eurasian Soil Science**, v.27, n.12, p.58-67, 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.
- NABLE, R.O.; LANCE, R.C.M.; CARTWRIGHT, B. Uptake of boron and silicon by barley genotypes with differing susceptibilities to boron toxicity. **Annals of Botany**, v.66, p.83-90, 1990.
- PARRY, R.; PLOWMAN, D.; DELVES, H.T.; ROBERTS, N.B.; BIRCHALL, J.D.; BELLIA, J.P.; DAVENPORT, A.; AHMAD, R.; FAHAL, I.; ALTMANN, P. Silicon and aluminium interactions in haemodialysis patients. **Nephrology Dialysis Transplantation**, v.13, n.7, p.1759-1762, 1998.
- PERSHIN, B.M.; PERSHINA, A.N.; EGORINA, L.M. Silicon and rice production in the Primorskii region. **Agrokhimiya**, v.10, p.68-74, 1995.
- POLLE, E.; KONZAK, C.F.; LITTRIK, J.A. Visual detection of aluminium tolerance levels in wheat by hematoxylin staining of seedling roots. **Crop Science**, v.18, p.823-827, 1978.
- RAFI, M.M.; EPSTEIN, E.; FALK, R.H. Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Plant Physiology**, v.151, p.497-501, 1997.
- RAID, R.N.; ANDERSON, D.L.; ULLOA, M.F. Influence of cultivar and amendment of soil with calcium silicate slag on foliar disease development and yield of sugar cane. **Crop Protection**, v.11, p.84-88, 1992.
- RAIJ, B.van; CAMARGO, O.A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, v.32, p.223-236, 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.
- SAVANT, N.K.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. Depletion of plant-available silicon in soils: a possible cause of declining rice yields. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.28, p.1245-1252, 1997a.
- SAVANT, N.K.; SNYDER, G.H.; DATNOFF, L.E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, v.58, p.151-199, 1997b.
- SCHWARZ, K.; MILNE, D.B. Growth promoting effects of silicon in rats. **Nature**, n.239, p.333-334, 1972.
- TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H., (Ed.). **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. cap.5, p.420-433.
- TRÉGUER, P.; NELSON, D.M.; BENNEKOM, A.J.van; DeMASTER, D.J.; LEYNAERT, A.; QUÉGUINER, B. The silica balance in the world ocean: a reestimate. **Science**, v.268, p.375-379, 1995.
- WERNER, D. Silicate metabolism. In: WERNER, D. (ed.). **The biology of diatoms**, Oxford: Blackwells Scientific, 1977. p.110-149.
- WERNER, D.; ROTH, R. Silica metabolism. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R.L. (ed.). **Encyclopedia of plant physiology. New Series**, Berlin: Springer-Verlag, v.15B, p.682-694, 1983.
- WILD, A. **Russel's soil conditions and plant growth**. 11 ed. London: Longman, 1988. 991p.
- WINSLOW, M.D. Silicon, disease resistance and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. **Crop Science**, v.32, p.1208-1213, 1992.