



O SILÍCIO EM SISTEMAS INTENSIVOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Oscar Fontão de Lima Filho

Centro de Pesquisa Agropecuária do Oeste – Embrapa, C.P. 661, CEP 79804-970, Dourados, MS,
oscar@cpao.embrapa.br

Introdução

Em 1811 Gay Lussac (1778-1850) e Louis Thenard (1777-1857) prepararam o silício amorfo impuro por aquecimento do fluoreto de silício (SiF_4) com potássio. No entanto, atribui-se a descoberta do silício a Jacob Berzelius (1779-1848), em 1823, preparando o silício amorfo como seus antecessores, mas purificando-o com sucessivas lavagens para retirar os fluorsilicatos, conseguindo isolar o elemento. Em 1814 o cientista inglês Humprey Davy (1778-1829) escrevia em seu livro “Elementos de Química Agrícola”: *”A epiderme silicosa das plantas serve como um suporte, protege a casca da ação de insetos e parece fazer parte na economia destas tribos vegetais frágeis (Gramíneas e Equisetáceas) semelhante àquelas desempenhadas no reino animal pelas conchas de insetos crustáceos”*. A partir de meados do século XIX, alguns cientistas escreviam sobre a importância do silício para as plantas. Em seu livro “Organic Chemistry in its application to agriculture and physiology” (1840), Justus von Liebig (1803-1873), agrônomo e químico alemão, foi o primeiro a sugerir o uso do silício como fertilizante, na forma de silicato de sódio. Também foi o primeiro pesquisador a realizar um experimento em casa-de-vegetação. Dmitry Mendeleev (1834-1907), químico russo, sugeria em 1870 o uso da sílica amorfa como fertilizante silicatado. John Bennet Lawes (1814-1900), fundador da Estação Experimental de Rothamsted, na Inglaterra, iniciou os primeiros experimentos de campo com fertilizantes silicatados em 1856. Outros pesquisadores do mesmo instituto, como Daniel Hall (1864-1942), publicaram trabalhos sobre o efeito do silício em gramíneas.

Os exemplos citados acima mostram que pesquisadores pioneiros já anteviam o papel importante que o silício poderia desempenhar na agricultura. Entretanto, até pouco tempo atrás, nutricionistas e fisiologistas de plantas davam pouca atenção a este elemento, talvez pela onipresença e abundância na crosta terrestre, fazendo crer na ausência de carências. Textos multidisciplinares na área agrícola, com informações da pesquisa recente, podem ser obtidas em Datnoff et al. (1999), Silicon in Agriculture Conference (2002) e Silicon in Agriculture Conference (2005).

O que é o silício?

O silício é um elemento cinza escuro com propriedades elétricas e físicas de um semi-metal, desempenhando no reino mineral um papel cuja importância pode ser comparável ao carbono nos reinos vegetal e animal. Semelhante a este, porém de modo menos intenso, o silício possui a capacidade de formar longas cadeias, muitas vezes ramificadas. A palavra silício provém do latim *silix*, 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 ou Paleolítica.

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre com 27% em massa, superado apenas pelo oxigênio. O silício não é encontrado na sua forma elementar na natureza, devido à sua alta afinidade pelo oxigênio. É encontrado somente em formas combinadas, como a sílica e minerais silicatados, com fórmula geral $Si_aO_bX_c$, no qual X representa um ou mais cátions, tais como alumínio (aluminossilicatos), magnésio (talco), cálcio (wolastonita), magnésio e ferro (olivina) e muitos outros, além da presença quase constante do hidrogênio. As letras a, b e c ditam a estequiometria e a estrutura do mineral. Silicatos que estão no nosso dia a dia, como o vidro e a areia, contêm somente hidrogênio como cátion acompanhante, com uma notação geral simplificada de SiO_2 (Sripanyakorn et al., 2005).

Cerca de 80% dos minerais das rochas ígneas e metamórficas são silicatos, enquanto em rochas sedimentárias o conteúdo é menor. 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 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 alumínio 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 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 do silício, constante tanto na crosta terrestre como em meteoritos, é a seguinte: ^{28}Si - 92,28%, ^{29}Si - 4,67%, ^{30}Si - 3,05%.

Com a pesquisa científica demonstrando e a prática agrícola comprovando os inúmeros benefícios da adubação silicatada para as plantas, a tendência de multiplicação dos ensaios com este elemento e a prática da adubação silicatada pelos agricultores é irreversível. Entretanto, devemos focar a importância do silício sob duas óticas: da planta e do consumidor desta planta ou de seus derivados.

O silício nos seres humanos

O silício é essencial para animais. A confirmação ocorreu 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 silício afetou a osteogênese em ratos (Schwarz & Milne, 1972) e a síntese de tecidos conectivos em pintos (Carlisle, 1972). O silício é o terceiro elemento traço essencial mais abundante do corpo humano, após o ferro e o zinco. Os teores mais altos de silício ocorrem em tecidos conectivos, especialmente aorta, traquéia, tendões, ossos e pele. Também é encontrado em outros órgãos, como timo, supra-renais, pâncreas, fígado, coração, músculo, pulmão e baço, por exemplo. O conteúdo elevado em tecidos conectivos se deve, provavelmente, à ligação do silício a cadeias polissacarídicas longas e não ramificadas, denominadas de glicosaminoglicanos e a seus complexos com proteínas. Também existe silício não associado a proteínas no sangue (Solomons, 1984; Carlisle, 1997; Sripanyakorn et al., 2005). Além de promover a biossíntese de colágeno e a formação e calcificação dos tecidos ósseos, o silício está envolvido no metabolismo de fosfolípidos, bem como afeta o conteúdo de cálcio no corpo, o qual está associado intimamente à idade. O silício também está associado à lã animal e às moléculas de queratina de chifres (Kolesnikov & Gins, 2001). A deficiência de silício pode aumentar a susceptibilidade a doenças, como artrite degenerativa e arteriosclerose, bem como o

envelhecimento precoce da pele e a fragilidade das unhas (Loeper et al., 1979; Laín, 1995; Kolesnikov & Gins, 2001).

Como se pode notar, é fundamental que a dieta alimentar contenha níveis adequados de silício. Ainda não foram estabelecidos os valores nutricionais adequados para a ingestão de silício, mas estima-se que a dieta humana diária deva conter de 20 a 30 mg de SiO_2 (Monceaux, 1960; Kolesnikov & Gins, 2001). Alguns fatores podem contribuir para que a ingestão de silício seja sub-ótima, induzindo carências marginais em humanos, que podem levar a uma debilitação de tecidos que o requerem em maior quantidade, como tecido conjuntivo, tendões, ossos, pele, pêlos e unhas. Esses fatores estão ligados principalmente à produção dos alimentos no campo: 1) cultivares modernos com potencial de extração de nutrientes cada vez maior, principalmente em função da maior produtividade; 2) exportação de silício por meio das colheitas sem a devida reposição do elemento; 3) solos naturalmente pobres em silício disponível para as plantas; 4) uso crescente de defensivos que diminuem a população de microrganismos do solo que atuam como solubilizadores de silicatos; 5) Menor consumo de fibras pela população, onde se concentra uma grande parte do silício nos alimentos. Além disso, o homem está geneticamente condicionado a consumir níveis de silício bem mais elevados que os atuais, pois a sua dieta tem sido rica em fibras há milhares de anos. Atualmente, porém, o maior consumo de alimentos processados e mais pobres em fibras, particularmente em países mais desenvolvidos, contribui para a menor ingestão de silício. Uma fonte importante de silício é a água que a população consome, cujos níveis de silício variam, principalmente, com a sua origem geológica (Perry & Keeling-Tucker, 1998). Com o advento do tratamento da água com sulfato de alumínio para agregar partículas no processo da floculação, os teores de silício ficaram ainda mais baixos.

O silício nas plantas

A relação entre a absorção do silício e o crescimento vegetal foi investigado pela primeira vez há mais de cem anos. O silício é um nutriente em diatomáceas, que o absorvem ativamente, provavelmente através do co-transporte com o sódio. A falta de silício afeta negativamente a síntese de DNA e de clorofila nestes organismos (Werner, 1977; Raven, 1983). É essencial, também, para radiolárias e coanoflagelados. A essencialidade do silício 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 silício para membros da família *Equisetaceae* (“cavalinha” ou “rabo de cavalo”).

A comprovação da essencialidade do silício é muito difícil de ser obtida, devido à sua ubiquidade na biosfera. O silício está presente em quantidades significativas mesmo em sais nutrientes, água e ar altamente purificados (Werner & Roth, 1983). Os conceitos de essencialidade estabelecidos por Arnon & Stout (1939) são, até hoje, utilizados pelos nutricionistas e fisiologistas: 1) a deficiência torna impossível para a planta completar o estágio vegetativo ou reprodutivo do seu ciclo de vida; 2) tal deficiência é específica para o elemento em questão, podendo ser corrigida ou impedida somente com o seu fornecimento; 3) o elemento está diretamente envolvido na nutrição da planta, sendo constituinte de um metabólito essencial ou exigido para a ação de um sistema enzimático, independentemente dos possíveis efeitos em corrigir alguma condição microbiológica ou química desfavorável do solo ou outro meio de cultura. Por estes critérios, a essencialidade para o silício foi demonstrada apenas para alguns grupos de plantas, considerando-se, ainda, as limitações em retirar o silício do meio nutriente.

Epstein (1999) coloca o silício na categoria de “quase essencial”. De acordo com o autor, define-se um elemento como “quase essencial” quando ele se encontra onipresente nas plantas e sua deficiência pode ser severa o suficiente para apresentar efeitos ou anormalidades no crescimento, desenvolvimento, reprodução ou viabilidade.

Mas podemos definir a essencialidade de um elemento quando a diminuição da resistência da planta a qualquer fator estressante, seja ele biótico ou abiótico, ocorre quando a concentração do elemento está abaixo de um limite crítico (Exley, 1998). O silício se enquadra nesta definição, já que a sua carência pode resultar em diminuição da capacidade biológica da planta em resistir às condições adversas do meio ambiente (Rafi et al., 1997).

Estudos científicos têm demonstrado aumentos significativos na taxa fotossintética, melhoria da arquitetura foliar e de outros processos no metabolismo vegetal, tendo como resultado final um aumento e maior qualidade na produção. O silício tem um papel importante nas relações planta-ambiente, pois pode dar às culturas condições para suportar adversidades climáticas, edáficas e biológicas.

A utilização do silício na agricultura torna-se particularmente interessante quando o consideramos um anti-estressante natural. Estresses causados por temperaturas extremas, veranicos, metais pesados ou tóxicos, por exemplo, podem ter seus efeitos reduzidos com o uso do silício. A fertilização com silício pode, também, aumentar a resistência a várias doenças fúngicas bem como para algumas pragas (Adatia & Besford, 1986; Takahashi, 1995; Savant et

al., 1997b). No caso das doenças, inúmeros trabalhos mostram que o aumento da resistência da planta ao patógeno pode ser devido a uma alteração das respostas da planta ao ataque do parasita, aumentando a síntese de toxinas (fitoalexinas), que podem agir como substâncias inibidoras ou repelentes e a formação de barreiras mecânicas (Marschner, 1995).

O estímulo na fotossíntese e no teor de clorofila aumenta a assimilação de nitrogênio em compostos orgânicos nas células, o suprimento de carboidratos, o fornecimento de material para a parede celular e a atividade radicular. Com isso há uma maior absorção de água e nutrientes, notadamente nitrogênio, fósforo e potássio e um maior poder de oxidação das raízes. A acumulação de silício nas células da epiderme, particularmente em gramíneas, mantém as folhas mais eretas, aumentando a penetração da luz, diminuindo a transpiração excessiva, evitando ou diminuindo o estresse hídrico nas folhas e aumenta a resistência ao acamamento (Takahashi, 1995; Epstein, 1999).

Os principais benefícios passíveis de serem obtidos com o uso agrícola do silício no crescimento, desenvolvimento e produtividade são os seguintes: aumenta o crescimento, a produtividade, a força mecânica do colmo e a resistência ao acamamento, a atividade radicular (promovendo a absorção de água e nutrientes, principalmente nitrogênio, fósforo e potássio), o poder de oxidação das raízes, a resistência a pragas e doenças, a proteção contra temperaturas extremas e ao estresse salino, a massa individual das sementes e a fertilidade dos grãos de pólen, a produção de carboidratos e açúcares; neutraliza o alumínio tóxico do solo, bem como diminui a toxidez causada pelo manganês e outros metais pesados; favorece a penetração da luz no dossel da planta por manter as folhas mais eretas, promovendo assim a fotossíntese; em gramíneas diminui a transpiração excessiva aumentando a resistência a veranicos; promove a formação de nódulos em leguminosas e a fixação simbiótica do nitrogênio.

O silício no solo

Solos tropicais e subtropicais sujeitos à intemperização e lixiviação, com cultivos sucessivos, tendem a apresentar baixos níveis de silício trocável. Estes solos, normalmente, apresentam baixo pH, alto teor de alumínio, baixa saturação em bases e alta capacidade de fixação de fósforo, além de uma atividade microbiológica reduzida. Solos arenosos são particularmente pobres em silício disponível para as plantas.

Ao adicionarmos um nutriente ao solo por meio da adubação, ocorrem reações químicas que podem modificar, para mais ou para menos, os teores disponíveis de outros elementos. No caso do silício ocorrem interações com vários elementos que favorecem a

nutrição da planta. O ácido monossilícico, a forma solúvel presente na solução do solo e pela qual a planta absorve o silício, ajuda a proteger as plantas dos efeitos tóxicos do alumínio pela formação de hidroxialuminossilicatos inertes. Mas esta propriedade não se restringe apenas ao alumínio. O ácido silícico pode reagir com outros metais como ferro, manganês, cádmio, chumbo, zinco, mercúrio e outros, formando silicatos desses metais. No caso específico do manganês, a toxidez deste elemento nas plantas se caracteriza pelo aumento de compostos fenólicos, responsáveis pelas manchas pardas e necróticas nas folhas. A adição de silício suprime o aumento de ácidos fenólicos causados pelo excesso de manganês, diminuindo ou mesmo impedindo o aparecimento dos sintomas de toxidez. Em casos de estresses salinos o silício também pode ser benéfico. A concentração de sódio na parte aérea da planta diminui sensivelmente quando se adiciona silício em substratos com carência deste elemento (Takahashi, 1995; Savant, 1997, Chishaki & Horiguchi, 1997; Epstein, 1999).

O uso de fertilizantes silicatados, que normalmente apresentam boas propriedades de adsorção, aumenta a eficiência da adubação NPK, proporcionando uma menor lixiviação de potássio e outros nutrientes móveis no horizonte superficial. Com o aumento no teor de silicato no solo, ocorrem reações químicas de troca entre o silicato e fosfatos. Desta maneira há a formação de silicatos de cálcio, alumínio e ferro, por exemplo, com a liberação do íon fosfato, aumentando o teor de fósforo na solução do solo. Estudos indicam, também, a possibilidade do silício aumentar a translocação interna do fósforo para a parte aérea da planta (Savant, 1997; Takahashi, 1995; Epstein, 1999).

Considerações finais

As pesquisas têm demonstrado o envolvimento do silício em vários aspectos estruturais, fisiológicos e bioquímicos da vida das plantas com papéis bastante diversos. A diminuição na resistência da planta a fatores estressantes, bióticos ou abióticos, ou seja, causados por desequilíbrios nutricionais, doenças fúngicas, pragas e condições climáticas adversas pode ocorrer quando a concentração de ácido silícico estiver abaixo de um limite crítico na solução do solo e, conseqüentemente, na planta. A maior disponibilidade de fontes comerciais de silício no Brasil pode possibilitar ao agricultor optar por uma tecnologia que revela-se eficaz, do ponto de vista técnico, no aumento da produtividade e na prevenção ou redução de estresses. A inclusão da adubação silicatada no manejo nutricional da planta pode significar culturas mais saudáveis, mais resistentes a estresses e mais produtivas, além de poder proporcionar alimentos com teores de silício mais adequados para a população.

Referências bibliográficas

- 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.
- 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.
- CARLISLE, E. M. Silicon as an essential element for the chick. **Science**, n. 178, p. 619-621, 1972.
- CARLISLE, E. M. Silicon. In: O'DELL, B. L. & SUNDE, R. A. **Handbook of nutritionally essential mineral elements**. New York: Marcel Dekker, 1997. p. 603-608.
- CHEN, C.H.; LEWIN, J. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. **Canadian Journal of Botany**, v. 47, p. 125-131, 1969.
- CHISHAKI, N.; HORIGUCHI, T. Responses of secondary metabolism in plants to nutrient deficiency. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 43, p. 987-991, 1997.
- DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in Agriculture**; Studies in Plant Science, 8. Amsterdam: Elsevier Science, 1999. 403p.
- 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.
- EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology**, v. 50, p. 641-664, 1999.
- EXLEY, C. Silicon in life: a bioinorganic solution to bioorganic essentiality. **Journal of Inorganic Biochemistry**, v. 69, p. 139-144, 1998.
- KOLESNIKOV, M. P. & GINS, V. K. Forms of silicon in medicinal plants. **Applied Biochemistry and Microbiology**, v. 37, n. 5, p. 524-527, 2001.
- LAÍN, E. R. **Silicio: enfermedades degenerativas ósseas**. Madrid: Real Academia de Ciencias Veterinárias, 1995. Disponível em: <<http://www.racve.es/actividades/medicina-veterinaria/1995-04-19EnriqueRondaLain.htm>>. Acesso em: 8 ago. 2006.
- LOEPER, J.; GOY-LOEPER, J.; ROZENSZTAJN, L. The antiatheromatous action of silicon. **Atherosclerosis**, v. 33, p. 397-408, 1979.
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of higher plants**. 2 ed. New York: Academic Press, 1995. 887p.
- MONCEAUX, R. H. Le silicium etude biologique et pharmacologique. **Produits Pharmaceutiques**, v. 5, n. 3, p. 99-109, 1960.

- 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.
- 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.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, v. 58, p. 151-199, 1997.
- SCHWARZ, K.; MILNE, D. B. Growth-promoting effects of silicon in rats. **Nature**, v. 239, p. 333-334, 1972.
- SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 2., Tsuruoka, 2002. Tsuruoka: Silicon in Agriculture Organizing Committee/Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 2002. 281p.
- SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., Uberlândia, 2005. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005. 152p.
- SOLOMONS, N. W. The other trace mineral: manganese, molybdenum, vanadium, nickel, silicon, and arsenic. In: SOLOMONS, N. W. & ROSENBERG, I. H. **Absorption and malabsorption of mineral nutrients**. New York: Alan R. Liss, 1984. p. 269-295.
- SRIPANYAKORN, S. JUGDAOHSINGH, R.; THOMPSON, R. P. H.; POWELL, J. J. Dietary silicon and bone health. **Nutrition Bulletin**, v. 30, p. 222-230, 2005.
- TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. cap. 5, p. 420-433.
- WERNER, D.; ROTH, R. Silica metabolism. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. **Encyclopedia of plant physiology. New Series**, Berlin: Springer-Verlag, v. 15B, p. 682-694, 1983.
- WERNER, D. Silicate metabolism. In: WERNER, D. **The biology of diatoms**, Oxford: Blackwells Scientific, 1977. p.110-149.