

**SILÍCIO EM MUDAS DE CAFEEIRO: EFEITO  
NA NUTRIÇÃO MINERAL E NA  
SUSCETIBILIDADE À CERCOSPORIOSE EM  
TRÊS VARIEDADES**

**ADÉLIA AZIZ ALEXANDRE POZZA**

**2004**

**ADÉLIA AZIZ ALEXANDRE POZZA**

**SILÍCIO EM MUDAS DE CAFEIEIRO: EFEITO NA NUTRIÇÃO  
MINERAL E NA SUSCETIBILIDADE À CERCOSPORIOSE EM TRÊS  
VARIEDADES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras  
como parte das exigências do Curso de Doutorado em  
Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição  
de Plantas, para a obtenção do título de “Doutor”

Orientadora:

Profª. Dra. Janice Guedes de Carvalho

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2004

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Pozza, Adélia A. A.

Silício em mudas de cafeeiro: efeito na nutrição mineral e na suscetibilidade à cercosporiose em três variedades / Adélia A. A. Pozza. -- Lavras : UFLA, 2004.  
88 p. : il.

Orientador: Janice Guedes de Carvalho.  
Tese (Doutorado) – UFLA.  
Bibliografia.

1. Nutrição x Doença. 2. *Cercospora coffeicola*. 3. Eficiência nutricional. 4.  
*Coffea arabica*. 5. Controle. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-633.7335  
-633.739352

**ADÉLIA AZIZ ALEXANDRE POZZA**

**SILÍCIO EM MUDAS DE CAFEIEIRO: EFEITO NA NUTRIÇÃO  
MINERAL E NA SUSCETIBILIDADE À CERCOSPORIOSE EM TRÊS  
VARIEDADES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras  
como parte das exigências do Curso de Doutorado  
em Agronomia, área de concentração em Solos e  
Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de  
“Doutor”

APROVADA em 17 de setembro de 2004

Profª. Dra. Hermínia Emília Prieto Martinez  
Prof. Dr. Paulo Estevão de Souza  
Prof. Dr. Ruy Carvalho  
Pesq. Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães

UFV/DFT  
UFLA/DFP  
UFLA/DQI  
EPAMIG/CTSM

Profª. Dra. Janice Guedes de Carvalho  
UFLA/DCS  
(Orientadora)

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL

**Aos meus pais, Aziz (*in memoriam*) e Amalim.**

**Às minhas filhas, Aline e Ana.**

**Ao meu querido Edson.**

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela saúde, pela proteção espiritual e por iluminar todos os meus caminhos.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade oferecida para a realização do curso.

Ao CNPq pela concessão da bolsa e ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, pelo auxílio financeiro e pela bolsa nos primeiros meses do doutorado.

À prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Janice Guedes de Carvalho, pela amizade, pelo incentivo e pela orientação durante o curso.

Ao Dr. Paulo Tácito G. Guimarães pelos conhecimentos transmitidos, pela contribuição essencial no planejamento, na execução deste trabalho e pela co-orientação durante o curso.

Aos professores Nilton Curi, Paulo Estevão, Ruy Carvalho, Hermínia, e a pesquisadora Miralda pela contribuição, cordialidade e atenção.

Aos Docentes do Curso de Ciência do Solo e Nutrição de Plantas, pelos ensinamentos transmitidos.

À minha mãe, ao Xandinho, meu segundo pai e à Kaína, pelo apoio incondicional em todos os momentos de minha vida. Saber que se pode contar com alguém é o bem mais precioso que carrego.

Aos meus irmãos José e Iria, Maria e Paulo, Miguel (*in memorian*) e Fátima, Biso e Fernando, Maron e Janet, Azizinho e Telma, pelo carinho.

Aos meus sobrinhos, sobrinhas, Celiana, Nadília e também a toda família de meu marido, por estarem sempre presentes e pelo agradável convívio.

Aos amigos Ana Rosa, Renato, Alexandre e Isabel, pelo incentivo, apoio e compreensão nas horas alegres e tristes.

Aos colegas Juliana Lasmar, Marcelo Romaniello e Dr. Francisco Nogueira, Tadeu e Deila pelo companheirismo e o apoio nas horas difíceis.

Aos funcionários do Departamento de Solos, em especial ao Adalberto pelas análises químicas realizadas, Delanne, Dulce, João Gualberto, Mundico, Manoel, Pezão, Humberto, Daniel, Vitor, Cristina, Roberto, Carlinhos, Maritza, Adriana, Maria Alice e Vera, que não mediram esforços para a realização deste trabalho

Aos funcionários da Fazenda Experimental da EPAMIG de Lavras, especialmente ao Mário Lúcio, Sr. Vander, Sr. Antônio Merejo, Cristóvão, Sr. Evaristo, Cláudia, Meire, Messias, Eliane, Geraldo, Samuel, Marcelo Malta, Geraldo Magela, Dula, Arlindo, Sr. Sebastião, José Antônio e Marcelo Pimenta pelo auxílio na condução do experimento e pela amizade.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

ADÉLIA AZIZ ALEXANDRE POZZA, filha de Amalim Said Aad e Aziz Alexandre Aad, nasceu em Viçosa, MG, em 29 de dezembro 1968.

Em 1995 graduou-se no curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal de Viçosa.

No período de 1996 a 1998, realizou o curso de mestrado em Fitotecnia/Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Viçosa sob orientação da Prof<sup>a</sup>. Dra. Hermínia E. Prieto Martinez.

De 1998 a 2001, foi bolsista do Consórcio Brasileiro de Pesquisa & Desenvolvimento do Café (CBP&D-Café), sob orientação do Pesquisador Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães do CTSM/EPAMIG.

Em julho de 2000, iniciou o Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Lavras, sob orientação da Prof<sup>a</sup>. Dra. Janice Guedes de Carvalho.



## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
RESUMO GERAL.....	i
GENERAL ABSTRACT.....	ii
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 Eficiência nutricional	4
2.2 Cercosporiose do cafeeiro	5
2.3 Silício	6
2.3.1 O silício no solo	7
2.3.2 Silício nas plantas	10
Essencialidade	10
Absorção, transporte e redistribuição do silício nas plantas	11
2.3.3 O silício no controle de doenças em plantas	12
Controle de doenças em monocotiledôneas	14
Controle de doenças em dicotiledôneas	17

2.3.4 Modo de ação do silício na resistência das plantas às doenças	21
Barreira física	21
Barreira química	22
Alteração na nutrição do hospedeiro estimulada por silício	25
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

<b>CAPÍTULO 2:</b> Efeito do silício no controle da cercosporiose em três variedades de cafeeiro.....	37
1 RESUMO.....	38
2 ABSTRACT.....	39
3 INTRODUÇÃO.....	40
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
6 CONCLUSÕES.....	50
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

<b>CAPÍTULO 3:</b> Eficiência nutricional das variedades de cafeeiro adubadas com silício.....	52
1 RESUMO.....	53
2 ABSTRACT.....	54
3 INTRODUÇÃO.....	55

4 MATERIAL E MÉTODOS.....	56
5 RESULTADOS E DISCUSSAO.....	60
5.1 Macronutrientes	60
5.2 Micronutrientes	67
5.3 Relação do acúmulo do nutriente entre a parte aérea e as raízes	75
6 CONCLUSÕES.....	77
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>82</b>

## RESUMO GERAL

POZZA, A.A.A. **Silício em mudas de cafeeiro: efeito na nutrição mineral e na suscetibilidade à cercosporiose em três variedades.** Lavras: UFLA, 2004. 83 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)\*

A crescente demanda nutricional por variedades de cafeeiros cada vez mais produtivas, assim como a expansão de lavouras para solos de baixa fertilidade natural têm exigido uma melhor compreensão da dinâmica dos nutrientes nessa cultura. Mesmo sem possuir função fisiológica específica e nutricional nas plantas, o silício é considerado útil ou benéfico por reduzir a intensidade de doenças, como a cercosporiose do cafeeiro. Sendo assim, conduziram-se estudos para verificar o efeito do Si na eficiência nutricional de mudas de três variedades de cafeeiro e a suscetibilidade destas à cercosporiose. Em um primeiro experimento avaliou-se o efeito do silício (1g de  $\text{CaSiO}_3/\text{kg}$  de substrato) no controle dessa doença nas variedades de cafeeiro Catuaí (IAC99), Mundo Novo (IAC379/19) e Icatu (IAC2942). As plantas de Catuaí tratadas com silicato tiveram redução de 63,2% nas folhas lesionadas e de 43% no total de lesões por planta, em relação à testemunha. A microanálise de raios X e o mapeamento para Si indicaram uma distribuição uniforme desse elemento em toda a superfície inferior das folhas de cafeeiro nas três variedades tratadas. Nas imagens de microscopia eletrônica de varredura também foi observada uma camada de cera bem desenvolvida na superfície inferior das folhas das plantas tratadas. Um segundo experimento foi conduzido em blocos casualizados e analisado em esquema fatorial (3 X 6) constando de três variedades combinadas com seis doses de silicato de cálcio ( $T_0=0$ ,  $T_1=0,0625$ ,  $T_2=0,125$ ,  $T_3=0,25$ ,  $T_4=0,5$  e  $T_5=1,0\text{g de CaSiO}_3/\text{kg}$ ) com quatro repetições. A variedade Icatu teve maior eficiência de absorção (EA) de Cu, Zn, Fe e Si, maior eficiência de utilização (EU) de N, K, Ca, B e Mn, não diferindo da Mundo Novo para os nutrientes N, Ca e Mn e maior eficiência de translocação (ET) de N, S, Zn e de Fe. A Catuaí teve maior EA de P, K, B e Mn, não diferindo da Mundo Novo para os nutrientes P, K e Mn, maior EU para Mg, S, Cu, Zn, Fe e Si, provavelmente devido à melhor ET destes nutrientes menos para Fe e Si. A Mundo Novo foi mais eficiente na absorção de N, K, Ca, Mg, Mn e Si, teve maior EU de P e Mn e maior ET de K, Ca, B, Mn e Si, além de ter a maior relação parte aérea:raízes e o maior peso da matéria seca total.

---

\* Comitê de orientação: Janice Guedes de Carvalho; Paulo Tácito Gontijo Guimarães.

## GENERAL ABSTRACT

POZZA, A.A.A. **Silicon in coffee out plants: effect on mineral nutrition and susceptibility to brown eye spot in three cultivars.** Lavras: UFLA, 2004. 83p. Thesis (Doctorate in Soils and Plant Nutrition)\*.

A better understanding of nutrient dynamics in coffee plants is been required as a function a greater nutritional requirement by more productive coffee cultivars and the expansion of these crops in low natural fertility soils. Silicon is considered to be useful for reducing disease intensity, as the brown eye spot in coffee plants, even so it does not have specific physiologic and nutritional function in plants. In this way, it were conducted studies in order to verify the effect of Si in nutritional efficiency of three cultivars of coffee out plants and their susceptibility to brown eye spot. In a first experiment, it was evaluated the effects of silicon (1g of  $\text{CaSiO}_3/\text{kg}$  of substrate) in the control of this disease in Catuaí (IAC 99), Mundo Novo (IAC 379/19) and Icatu (IAC 2942) coffee cultivars. The Catuaí plants treated with silicate had a reduction of 63.2% in lesioned leaves and 43% in the total of lesions per plant in relation to the control. The X-ray microanalysis and Si mapping indicated an uniform distribution of this element in all the inferior surface of leaves in all treated cultivars. Scanning electron microscopy images also showed a very developed wax layer on the lower leaf surfaces of treated plants. A second experiment was conducted in randomized blocks and it was analyzed in a 3 x 6 factorial scheme consisting of three cultivars combined with six doses of calcium silicate ( $T_0=0$ ,  $T_1=0.0625$ ,  $T_2=0.125$ ,  $T_3=0.25$ ,  $T_4=0.5$ , and  $T_5=1.0\text{g}$  of  $\text{CaSiO}_3/\text{kg}$ ) with four replications. The Icatu cultivar had more efficiency of uptake (EA) of Cu, Zn, Fe, and Si, and more efficiency of utilization (EU) of N, K, Ca, B, and Mn, not differing from Mundo Novo cultivar for N, Ca, and Mn, and having more efficiency of translocation (ET) for N, S, Zn, and Fe nutrients. The Catuaí had more EA of P, K, B, and Mn, not differing from Mundo Novo for P, K, and Mn, higher EU for Mg, S, Cu, Zn, Fe, and Si, probably because of a better ET of these nutrients with exception of Fe and Si. The Mundo Novo was more efficient in N, K, Ca, Mg, Mn and Si uptake, had higher EU of P and Mn, and higher ET of K, Ca, B, Mn, and Si beyond a higher aerial part: roots ratio and weight of total dry matter.

---

\* Guidance Committee: Janice Guedes de Carvalho; Paulo Tácito Gontijo Guimarães.

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUÇÃO GERAL

A cultura do cafeeiro no Brasil sempre ocupou posição de destaque, não só pela importância econômica, mas também por exercer importante função social, pois é geradora de grande número de empregos, diretos e indiretos, sendo responsável pela fixação de grande parte da população na zona rural. Considerando-se este aspecto e o plantio de lavouras cafeeiras em novas áreas de diferentes regiões do país, a produção de mudas livres de doenças torna-se cada vez mais importante (Pozza et al., 2001).

A implantação de cafezais é feita principalmente por meio de mudas produzidas em sacos plásticos com substrato constituído por 70% de terra de subsolo e 30% de esterco de curral e adubadas com fertilizantes químicos. Os tubetes também são utilizados e apresentam algumas vantagens quando comparados ao sistema tradicional de formação de mudas de cafeeiro, tais como: facilidade no manuseio e transporte das mudas, redução da área necessária para o viveiro e menor volume de substrato gasto para encher os tubetes. Nestes recipientes, no entanto, há necessidade de utilizar substratos com características físico-químicas adequadas e com quantidades suficientes de nutrientes para o crescimento e o desenvolvimento das mudas. Nesse sentido, deve-se encontrar um substrato uniforme em sua composição, rico em nutrientes, com elevada capacidade de retenção de água e troca catiônica, isento de pragas, patógenos e sementes de plantas daninhas e viável economicamente (Melo, 1999).

No viveiro de mudas, a cercosporiose ou “mancha-de-olho-pardo” (*Cercospora coffeicola* Berkeley & Cooke) é uma das principais doenças, responsável por intensa desfolha durante a formação de mudas. A incidência pode agravar-se em decorrência da deficiência hídrica prolongada ou da

adubação insuficiente e desequilibrada (Fernandez-Borrero et al., 1966). Nas lavouras do Espírito Santo e Minas Gerais a partir de 1971, observou-se uma alta intensidade da cercosporiose com redução de até 30% no rendimento dos grãos (Miguel et al., 1975). Entretanto, as maiores perdas ocorrem nos viveiros de mudas, onde a incidência é favorecida pelo molhamento foliar e elevada umidade relativa da irrigação por aspersão. As plantas apresentam intensa desfolha, redução no desenvolvimento e raquitismo, tornando-se impróprias ao plantio (Fernandez-Borrero et al., 1966). A principal forma de controle da doença é por aplicação de fungicidas. O controle químico é responsável muitas vezes por maior impacto ambiental, custos de produção elevados e redução na sustentabilidade do agroecossistema café. Contudo, essas preocupações têm estimulado tentativas para reduzir a quantidade de fungicidas utilizados na agricultura. A nutrição mineral adequada, no caso da cercosporiose, pode contribuir para reduzir de forma significativa a aplicação de fungicidas (Pozza, 1999).

Apesar de ser geneticamente controlada, a resistência das plantas às doenças pode ser influenciada por fatores ambientais. A nutrição mineral é um fator ambiental que pode ser manipulado com relativa facilidade e utilizado como um complemento ou método alternativo no controle de doenças (Marschner, 1995).

Mesmo sem possuir função fisiológica e nutricional específica, diversos trabalhos relacionam a adubação silicatada com a menor intensidade de doenças, em várias culturas. O mecanismo de ação do Si na resistência de plantas ainda não está totalmente esclarecido. A forma de deposição do Si na parede celular das plantas gerou a hipótese de uma possível barreira física, dificultando a penetração do fungo. No entanto, alterações da nutrição da planta promovidas pela adubação silicatada e o aumento da atividade de compostos fenólicos, polifenoloxidasas, quinases e peroxidases em plantas tratadas com Si,

levaram alguns autores (Samuels et al., 1991a e b; Chérif et al., 1992a,b; Chérif et al., 1994a e b) a levantar a hipótese deste elemento estar envolvido na indução de reações de defesa da planta.

O Si altera o pH do solo, próximo da rizosfera das plantas (Korndörfer & Gascho, 1999), influenciando, dessa forma, a absorção de nutrientes essenciais para ativar mecanismos de defesa e barreiras estruturais e também a eficiência nutricional de cultivares de cafeeiro em tubetes.

A espécie *C. arabica* é cultivada em todas as regiões cafeeiras do estado de Minas Gerais, com predominância das variedades Catuaí e Mundo Novo, havendo, entretanto, uma demanda, embora ainda em pequena escala, por novas variedades melhoradas (Bartholo, 2001). Espera-se que haja diferenças marcantes entre estas variedades quanto à eficiência nutricional e a resistência à cercosporiose.

Devido a importância da cultura do cafeeiro para o Brasil, dos prejuízos causados pela cercosporiose em mudas de cafeeiro e do potencial de utilização do Si como redutor do impacto ambiental causado por pesticidas, os objetivos destes trabalhos foram:

- a- verificar o efeito do Si na redução da intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.);
- b- comparar a intensidade de cercosporiose em três variedades, Catuaí Vermelho, Icatu e Mundo Novo, em resposta a doses de Si;
- c- mensurar a eficiência de absorção, de translocação e de utilização dos nutrientes em mudas de cafeeiros adubadas com silício.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Eficiência nutricional

A otimização da eficiência nutricional com o fornecimento adequado de nutrientes é fundamental para ampliar a produtividade e reduzir o custo de produção. Vários fatores, como clima, solo, planta e suas interações, afetam a absorção e a utilização de nutrientes pelas plantas. Para uma máxima eficiência nutricional, esses fatores devem estar no nível ótimo durante o desenvolvimento da cultura e a revisão de literatura mostra que existe grande potencial de se aumentar essa eficiência pelo manejo adequado dos componentes do sistema de produção (Fageria, 1998).

A exigência nutricional e o crescimento das plantas variam de acordo com a espécie e a cultivar (Fageria, 1998; Martinez et al., 1993), dependendo da sua eficiência de absorção (Swiader et al., 1981; Sands & Mulligan, 1990; Duncan & Baligar, 1990), de translocação (Li et al., 1991; Duncan & Baligar, 1990) e de uso dos nutrientes (Siddiqi & Glass, 1981; Sands & Mulligan, 1990; Duncan & Baligar, 1990).

Vários mecanismos relacionados às características morfológicas e fisiológicas da planta contribuem para o uso eficiente de nutrientes, tais como: sistema radicular extenso (que possibilita a exploração de um maior volume de solo), alta relação entre raízes e parte aérea, habilidade do sistema radicular em modificar a rizosfera (possibilitando superar baixos teores de nutrientes), maior eficiência de absorção ou de utilização de nutrientes, capacidade de manter o metabolismo normal com baixos teores de nutrientes nos tecidos e uma alta taxa fotossintética (Fageria & Baligar, 1993).

Um dos grandes desafios da agricultura moderna é a utilização de estratégias de adaptação de plantas a solos de baixa fertilidade. Nestes casos,

existem duas alternativas: elevar a fertilidade dos solos pelo uso de corretivos e fertilizantes ou empregar cultivares nutricionalmente eficientes. O conceito de eficiência de plantas na utilização de um nutriente engloba processos pelos quais elas absorvem, translocam, acumulam e utilizam melhor este nutriente para produção de matéria seca ou grãos, em condições nutricionais normais ou adversas.

## **2.2 Cercosporiose do cafeeiro**

A cercosporiose, também denominada "mancha-olho-de-pomba", "mancha-parda" ou "mancha-de-olho-pardo", tem como agente etiológico o fungo *C. coffeicola* pertencente à classe dos Deuteromycetes, ordem Moniliales, família Dematiaceae. O fungo é capaz de esporular em toda a superfície superior do limbo foliar (principalmente das folhas mais velhas) e nos frutos de café, formando grupos de conidióforos septados de coloração parda, mais ou menos eretos. Os conidióforos produzem conídios largos, multiseptados e hialinos.

Nas folhas, a primeira indicação macroscópica da doença é a presença de pequenos pontos necróticos de coloração marrom-claro, com mais ou menos 1 mm de diâmetro. As lesões, uma vez desenvolvidas, apresentam forma circular, centro branco rodeado por halo necrótico de coloração parda, zona clorótica exterior e medem, geralmente, entre 4 e 15 mm de diâmetro (Echandi, 1959).

De acordo com Fernandez-Borrero et al. (1966), a cercosporiose infecta principalmente plântulas em formação e mudas no viveiro, provocando intensa desfolha. Em plantações definitivas, o patógeno pode ocasionar grandes perdas na produção e notável redução na qualidade dos grãos. A adubação equilibrada e a utilização de substratos de boa qualidade são práticas recomendadas para a prevenção da doença. O controle da cercosporiose é feito, principalmente, por

fungicidas do grupo benzimidazóis e Pozza et al. (1997) recomendaram a aplicação do fungicida oxicloreto de cobre.

### **2.3 Silício**

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, apenas superado pelo oxigênio. Encontra-se na solução do solo na forma  $H_4SiO_4$  ou  $Si(OH)_4$ , essa última muito utilizada na literatura de nutrição mineral de plantas e mais condizente com o comportamento tetravalente dos elementos químicos do grupo carbono, como é o caso do Si (Shriver & Atkins, 2003). O  $Si(OH)_4$  é prontamente absorvido pelas plantas de forma passiva, via corrente transpiratória. Embora não seja considerado nutriente essencial às plantas, o Si é classificado, por muitos autores, como elemento benéfico ou útil devido aos efeitos positivos observados, como maior tolerância ao déficit hídrico, maior resistência à toxicidade de metais pesados e menor intensidade de doenças e pragas.

Trabalhos relacionando o papel do Si na resistência de plantas a doenças tiveram início na década de 1940. Resultados promissores foram encontrados em vários patossistemas, como a redução da intensidade da brusone, da mancha-parda e da queima-das-bainhas em plantas de arroz, da cercosporiose do cafeeiro, do cancro-da-haste em plantas de soja e da gomose em citrus e menor incidência de oídio em plantas de aveia, de pepino, de melão e de uva, quando as culturas foram adubadas com Si (Datnoff et al., 1991; Datnoff et al., 1997; Carver et al., 1998; Rodrigues, 2000; Santos, 2002; Pozza & Pozza, 2003; Lima, 1998; Faggiani, 2002; Samuels et al., 1991a; Menzies et al., 1992; Bowen et al., 1992).

O efeito do Si no controle de doenças de plantas, seu modo de ação e

sua atuação na epidemia de diversos patossistemas ainda não estão totalmente esclarecidos, embora tenham sido constatados trabalhos com este objetivo. Existe a hipótese de formação de barreira física, fundamentada na forma do 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, a observação de aumento da atividade de enzimas como peroxidase e polifenoxidase e a 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; Rodrigues et al., 2003, Pozza & Pozza, 2003).

O uso do Si como produto natural alternativo na redução de inúmeras doenças tem potencial comercial elevado. Cabe à pesquisa indicar o binômio doença/cultura e propor maneiras desta tecnologia ser aplicada com êxito em condições comerciais. Dessa forma, será abordado o comportamento do Si desde o solo até sua possível relação com a redução da intensidade de doenças de plantas.

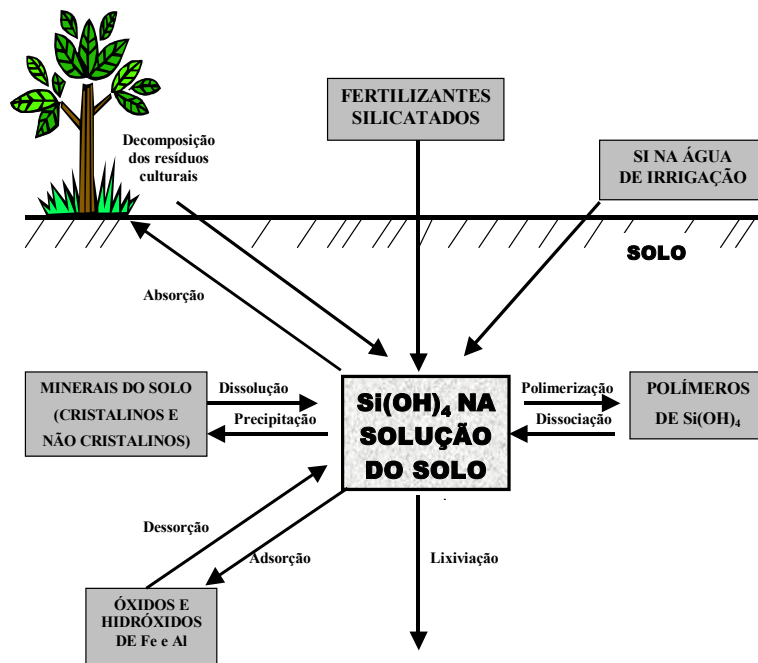
### **2.3.1 O Si no solo**

O silício, sendo abundante na crosta terrestre (Tisdale et al., 1993; Exley, 1998), está presente em minerais primários, como feldspato, augita, quartzo e mica, e em secundários, como a caulinita, montmorilonita, ilita e clorita (Raij, 1991; Exley, 1998). A principal forma de Si na solução do solo é o ácido silícico ou monossilícico,  $H_4SiO_4$  (Tisdale et al., 1993). A solubilidade dos minerais silicatados no solo é variável e influenciada por temperatura, pH, tamanho de partícula, composição química e pela adsorção do Si nas superfícies

de minerais (McKeague & Cline, 1963; Savant et al., 1997). Com relação ao pH, a solubilidade do Si em água não é afetada por valores de 2 a 9 (Tisdale et al., 1993), mas ela é bastante influenciada pela concentração: acima de  $120 \text{ mg.dm}^{-3}$  de  $\text{SiO}_2$ , o  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  polimeriza-se e, em seguida, precipita no solo (Marschner, 1995). O  $\text{Si(OH)}_4$  disponível na solução do solo pode vir da decomposição dos resíduos das culturas, dos fertilizantes silicatados, da água de irrigação, da dissociação dos polímeros de  $\text{Si(OH)}_4$ , da dessorção dos óxidos de ferro e de alumínio ou da dissolução dos minerais do solo. Por outro lado, quando o  $\text{Si(OH)}_4$  encontra-se na solução do solo, pode ser adsorvido a óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio, precipitar-se e formar minerais cristalinos ou não, formar polímeros, ser absorvido pelas plantas ou lixiviados (Figura 1).

Solos tropicais e subtropicais sujeitos ao intemperismo e à lixiviação, com cultivos sucessivos, tendem a apresentar baixas concentrações de Si trocável, 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 microbológica (Lima Filho et al., 1999). 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.

Apesar de não ser considerado fertilizante pela legislação brasileira, 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, entre elas: a) solubilidade, deve ser a mais alta possível, b) disponibilidade do produto, c) propriedades físicas, como partículas menores e uniformes visando facilitar aplicação, via foliar ou via solo, d) presença de contaminantes, principalmente no caso de escórias de siderurgia e e) custo relativamente baixo (Gascho, 2001).



**FIGURA 1.** Principais transformações/processos responsáveis por influenciar a concentração de Si na solução do solo (Adaptado de Savant et al., 1997).

Entre as fontes passíveis de utilização no Brasil tem-se a wollastonita que é o silicato de cálcio puro, muito utilizada em pesquisas por ser livre de contaminantes como ferro e fósforo (Rodrigues, 2000). Outra fonte de Si é o silicato de potássio, utilizado tanto em solução nutritiva quanto em pulverizações para controle de patógenos, como *Pythium* e *Sphaerotheca fuliginea* em pepino e *Uncinula necator* em videira (Chérif et al., 1992a,b; Samuels et al., 1994; Bowen et al., 1992). O silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) é eficaz para aplicação tanto via pulverização foliar (McAvoy & Bible, 1996) quanto via

solo. No entanto, no último caso, o sódio que acompanha o silicato, pode ser tóxico para as plantas. Entre as fontes comerciais, o silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) ou escória, originário de siderurgias, possui custo relativamente baixo, no entanto, pode apresentar como inconveniente a presença de metais pesados (Gascho, 2001). O cimento (contém de 9% a 23% de Si) também é citado como fonte alternativa de Si (Savant et al., 1999; Korndörfer et al., 2000), mostrando-se, no entanto, inviável devido ao alto custo.

Fontes de silicato de cálcio provenientes de siderurgia, wollastonita, silicato de magnésio e termofosfato, foram avaliadas por Korndörfer & 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 ferro. A deficiência foi mais acentuada no Neossolo Quartzarênico (NQ), que possuía baixo teor de Fe livre, no qual o Si permaneceu mais disponível para as plantas. O Si foi mais fortemente adsorvido ou “fixado” no Latossolo Vermelho férrico ( $\text{LV}_f$ ), Latossolo Vermelho (LV) e Vermelho Amarelo (LVA).

### **2.3.2 Si nas plantas**

#### **Essencialidade**

O Si não é considerado elemento essencial para as plantas (Jones & Handreck, 1967) porque não atende aos critérios diretos e indiretos de essencialidade. De acordo com o critério direto, um elemento é essencial quando faz parte de um composto ou quando participa de uma reação sem a qual a vida da planta é impossível. No critério indireto, um elemento é essencial quando: a) na sua ausência a planta não completa seu ciclo de vida, b) não pode ser substituído por nenhum outro, c) tem efeito direto na vida da planta e d) não

exerce apenas papel de neutralizar efeitos físicos, químicos ou biológicos desfavoráveis para o vegetal, (Malavolta, 1980). No entanto, Epstein (2001) cita efeitos benéficos relatados em culturas adubadas com Si como resistência a doenças e pragas, resistência à toxidez provocada por metais, menor evapotranspiração, promoção de nodulação em leguminosas, modulação da atividade de enzimas, efeitos na composição mineral, dentre outros (Figura 2). Por isso o Si é classificado como elemento benéfico ou útil (Malavolta, 1980; Tisdale et al., 1993; Marschner, 1995). Membros da família Equisetaceae (“cavalinha” ou *Equisetum arvense* “rabo de cavalo”) são as únicas espécies de plantas conhecidas nas quais o Si é inquestionavelmente essencial (Epstein, 1994). Essa espécie possui 50% de Si na forma de  $\text{SiO}_2$  e a maior concentração ocorre na epiderme, onde é arranjada em pequenas massas brilhantes visíveis a olho nu.

### **Absorção, transporte e redistribuição do Si nas plantas**

O Si é absorvido pelas plantas como ácido monossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), porém, seu teor na planta é variável entre as espécies (Epstein, 1994). São classificadas como plantas acumuladoras de Si aquelas cujos teores de  $\text{SiO}_2$  variam de 1% a 3% na matéria seca e não acumuladoras plantas com menos de 0,5% de  $\text{SiO}_2$  (Mengel & Kirkby, 1987; Marschner, 1995). Posteriormente outros conceitos foram anexados, sendo definidas como acumuladoras as plantas com teor de Si superior a 1% e com relação molar Si/Ca maior que 1. Gramíneas, como arroz e trigo, são exemplos deste grupo. Plantas como a soja e as cucurbitáceas, com 0,5% a 1% de Si na matéria seca, porém com relação molar Si/Ca inferior a 1, são classificadas como de exigência intermediária. Já plantas não acumuladoras apresentam como característica concentração de Si na

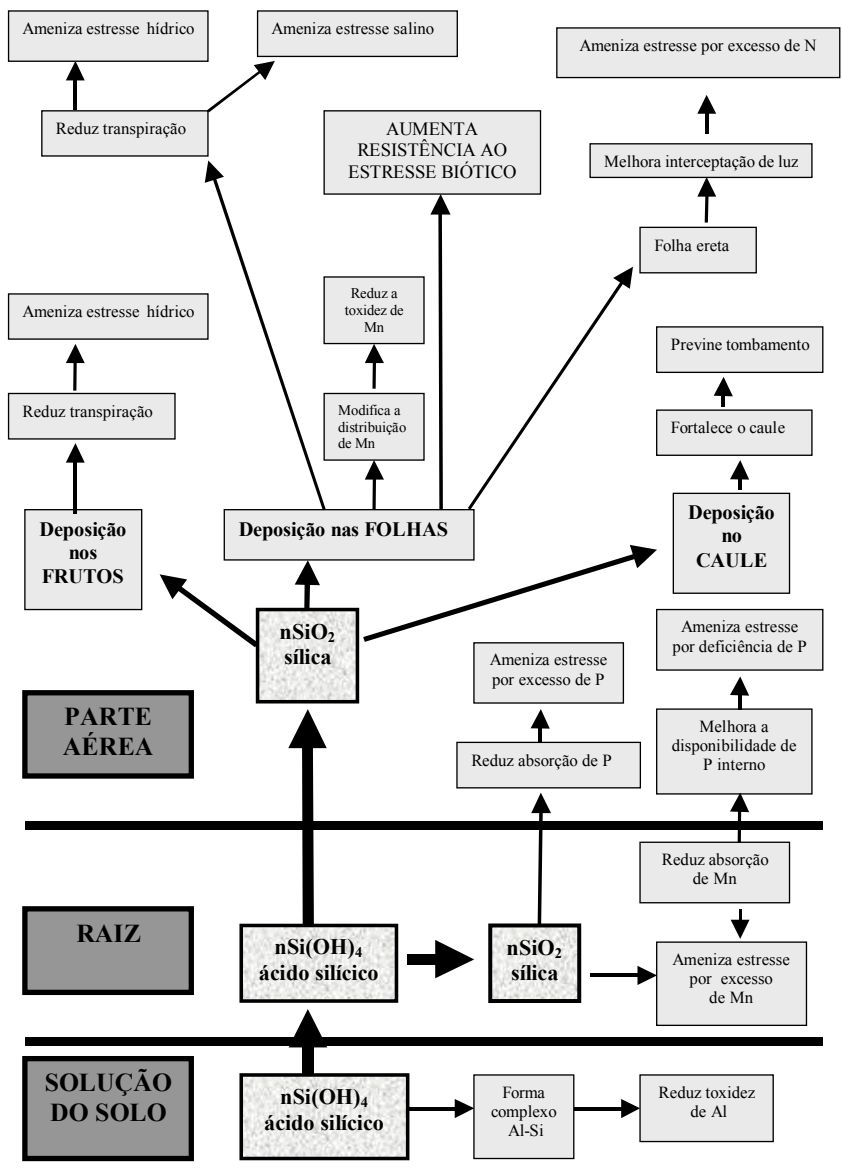


matéria seca inferior a 0,5% (Ma et al., 2001).

O transporte de Si a longa distância em plantas é limitado ao xilema (Balastra et al., 1989). O Si é depositado principalmente na forma de  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  amorfa ou opala. Uma vez depositado nessa forma, o Si fica imóvel e não é redistribuído (Parry & Smithson, 1964; Raven 1983). A baixa redistribuição do Si está relacionada com a sua precipitação como  $\text{SiO}_2$  (Jones & Handreck, 1967; Raven, 1983). A deposição de Si é encontrada tanto na parte aérea das plantas quanto nas raízes (Sangster & Parry, 1976; Sangster, 1978; Hodson & Sangster, 1988).

### **2.3.3 O Si no controle de doenças em plantas**

Todos os nutrientes essenciais podem influenciar a incidência e a severidade das doenças de plantas. Na literatura, há mais de 1.200 citações nas quais os nutrientes minerais estão aumentando, reduzindo ou exercendo efeitos variáveis sobre as doenças (Huber, 2002). Apenas para o Si, não foram encontradas citações nas quais ele aumentasse a intensidade de doenças. Observações sobre o efeito do Si no controle de doenças em plantas tiveram início na década de 1940 (Bélanger & Menzies, 2002). Inicialmente, estudaram-se as gramíneas, por serem plantas acumuladoras de Si e segundo diversos autores desenvolvem barreira física, de maneira a impedir a penetração de patógenos. No entanto, novas teorias sobre a indução de resistência levaram alguns pesquisadores a estudar o Si em não-acumuladoras, como as dicotiledôneas. Atualmente, diversas culturas apresentam resultados significativos na redução de doenças quando adubadas com Si (Tabela 1).



**FIGURA 2.** Efeitos benéficos do Si no crescimento de culturas em relação à estresses bióticos e abióticos (Adaptado de Ma et al., 2001).

## **Controle de doenças em monocotiledôneas**

Os estudos das doenças controladas por Si tiveram início com as monocotiledôneas, pois estas absorvem grandes quantidades deste nutriente. Numerosos trabalhos relatam o efeito benéfico do Si nestas plantas (Bélanger et al., 2003; Raid et al., 1992; Datnoff et al., 1991; 1997; Rodrigues, 2000; Epstein, 2001). Além destes, Barbosa Filho et al. (2000) relatam seu importante efeito no controle de várias doenças do arroz, planta típica acumuladora de Si. Em cana-de-açúcar, Ayres (1966), Fox et al. (1967) e Wong You Cheong et al. (1972) relataram a redução dos sintomas de manchas foliares, como a ferrugem e a mancha parda, nos tratamentos com silício.

Na Flórida, ao se comparar a adubação com Si e o tratamento com fungicidas, constatou-se que o controle da brusone e da mancha-parda pelo Si foi tão efetivo quanto com os fungicidas testados (Datnoff et al., 1997). As plantas de arroz foram tratadas com 0 e 2 t ha<sup>-1</sup> de silicato de cálcio (0 e 17 mM de SiO<sub>2</sub>), benomyl 0 e 1,68 kg.ha<sup>-1</sup> e propiconazole nas doses de 0 e 0,44 L.ha<sup>-1</sup>. A incidência da brusone foi de 73% na testemunha, 27% nos tratamentos com aplicação de benomyl e 36% nas plantas adubadas com Si. Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos com adubação silicatada e o benomyl para a mancha parda. O número de lesões, a área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD) e a severidade da mancha-parda foram drasticamente reduzidos com o uso da adubação silicatada (Tabela 2). Em outro trabalho na Flórida, para esta mesma cultura, em solo orgânico deficiente em silício, observou-se que a aplicação de 0, 5, 10 e 15 t.ha<sup>-1</sup> de silicato de cálcio (0, 42, 84 e 125 mM de SiO<sub>2</sub>) proporcionou redução linear da brusone e da mancha-parda em plantas de arroz, com o aumento das doses de silicato.

**TABELA 1.** Exemplos de doenças controladas com uso de Si.

<b>Cultura</b>	<b>Doenças</b>	<b>Referências</b>
Arroz	Brusone ( <i>Magnaporthe grisea</i> )	Datnoff et al. (1991)
	Mancha-marrom ( <i>Bipolaris oryzae</i> )	Datnoff et al. (1997)
	Queima-das-bainhas ( <i>Rhizoctonia solani</i> )	Rodrigues (2000)
Aveia	Oídio ( <i>Blumeria graminis</i> )	Carver et al. (1998)
Café	Cercosporiose ( <i>Cercospora coffeicola</i> )	Santos (2002)
		Pozza & Pozza (2003)
Cana-de-açúcar	Mancha-ocular ( <i>Leptosphaeria sacchari</i> )	Raid et al. (1992)
Citrus	Gomose ( <i>Phytophthora nicotianae</i> pv. <i>parasitica</i> )	Faggiani (2002)
Melão	Oídio ( <i>Sphaerotheca fuliginea</i> )	Menzies et al. (1992)
Pepino	Oídio ( <i>Sphaerotheca fuliginea</i> )	Samuels et al. (1991a)
	Podridão-de-raiz ( <i>Pythium ultimum</i> )	Chérif et al. (1992a, b)
	Podridão-de-raiz ( <i>P. aphanidermatum</i> )	Chérif et al. (1994b)
Soja	Cancro-da-haste ( <i>Diaporthe phaseolorum</i> f. sp. <i>meridionalis</i> )	Lima (1998)
Trigo	Oídio ( <i>Blumeria graminis</i> f.sp. <i>tritici</i> )	Bélanger et al. (2003)
Videira	Oídio ( <i>Uncinula necator</i> )	Bowen et al. (1992)

**TABELA 2.** Efeito de propiconazole e do Si no crescimento da mancha-parda em arroz (Datnoff et al., 1997).

<b>Tratamento</b>	<b>Número de lesões</b>	<b>AACPD<sup>a</sup></b>	<b>Severidade da mancha parda<sup>b</sup></b>
Testemunha	2,5 a <sup>c</sup>	2772 a	87 a
Propiconazole (P)	2,0 b	1124 b	61 b
Silício (Si)	1,6 c	583 c	37 c
Si + P	0,6 d	284 d	14 d

<sup>a</sup> AACPD – área abaixo da curva de progresso da doença.

<sup>b</sup> Severidade da mancha parda baseada na escala de 0 a 9, em que 0 = planta sadia e 9 = 76 % de severidade ou mais. A porcentagem média de área foliar afetada de cada avaliação numérica foi utilizada para estimar as diferenças entre tratamentos.

<sup>c</sup> Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste FLSD (P=0,05).

A severidade da brusone e da mancha-parda diminuíram em 30,5% e 15%, respectivamente, em relação à testemunha. Outro benefício observado foi a redução na severidade dessas doenças nos cultivos posteriores devido ao resíduo do silicato no solo (Datnoff et al., 1991).

Na África, em solo muito intemperizado, a adubação de plantas de arroz com silicato de sódio (18,7 g de Si./m<sup>2</sup>) duplicou a absorção de Si e reduziu significativamente a escaldadura das folhas, a brusone e a mancha dos grãos (Winslow, 1992). No Brasil, a aplicação de wollastonita, nas doses 0, 2, 4, 6, 8 t.ha<sup>-1</sup> (0,17, 34, 51 e 68 mM de SiO<sub>2</sub>), reduziu a severidade da queima-das-bainhas (*Rhizoctonia solani*) em arroz. Com o aumento das doses de Wollastonita, as cultivares Metica-1, Rio Formoso e Cica-8 tiveram menores números de lesões por planta (Rodrigues, 2000). O autor atribuiu esse resultado não apenas à formação de barreira física abaixo da epiderme, mas também a uma possível indução dos mecanismos de resistência no hospedeiro.

Em cana-de-açúcar, Raid et al. (1992) observaram redução de até 67%

na severidade de mancha-ocular (*Leptosphaeria sacchari*) nas plantas tratadas com silicato de cálcio (escória), nas cinco cultivares estudadas (CP72-1210, CP74-2005, CP80-1827, CP70-1133 e CP72-2086). No mesmo experimento não foi detectado efeito do silicato no controle da ferrugem (*Puccinia melanocephala*). Os autores justificaram seus resultados com a hipótese de Yoshida et al. (1969), na qual o ácido silícico polimeriza-se na parede celular e contribui para a formação de uma membrana a base de celulose. Esta membrana seria a principal responsável por proteger as plantas contra alguns patógenos.

### **Controle de doenças em dicotiledôneas**

O interesse pelo estudo de patossistemas envolvendo plantas dicotiledôneas surgiu na segunda metade do século passado, centralizando-se principalmente, nos estudos com oídio. Entre eles citam-se oídio no pepino e na videira (Faggiani, 2002). Além destes, também foram estudados “damping-off” em pepineiros (Chérif et al., 1994a), gomose em limão-cravo (Faggiani, 2002), o cancro-da-haste em soja (Lima, 1998) e a cercosporiose em cafeeiros (Santos, 2002).

Pepineiros inoculados com oídio (*Sphaerotheca fuliginea*) e cultivados em solução nutritiva suplementada com silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) nas doses de 0; 0,45; 0,9; 1,35 e 1,8 mM apresentaram redução no número de colônias por folha, redução na área das colônias e no poder germinativo dos conídios quando comparados àqueles nos quais o Si não foi adicionado à solução nutritiva (Menzies et al., 1991a). Posteriormente, os mesmos autores compararam a forma de aplicação do silicato: testaram aplicações foliares de  $\text{SiO}_2$  nas doses 0; 1,7; 8,5 e 17,0 mM e, ainda, via solução nutritiva na dose 1,7 mM (Menzies et al., 1992). Concluíram que proporções iguais ou maiores do

que 17 mM (1000 mg/kg) via foliar, foram tão efetivas quanto a aplicação de 1,7 mM (100 mg/kg) na solução nutritiva, demonstrando, dessa forma, a viabilidade das duas alternativas para o controle do oídio em plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.), melão (*Cucumis melo* L.) e abóbora (*Cucurbita pepo* L.).

A distribuição de Si nas folhas de pepineiro infectadas por oídio (*S. fuliginea*) foi estudada por Samuels et al. (1991a). Com o uso de microscópio eletrônico de varredura e análise dispersiva de raio X, os autores observaram, na base dos tricomas, o acúmulo de Si nas regiões em que o patógeno tentava penetrar. As plantas tratadas com Si tiveram colônias significativamente menores quando comparadas às plantas controle e, durante a infecção por *S. fuliginea*, as áreas da parede celular adjacentes à hifa do patógeno apresentaram alteração na morfologia da superfície e alta concentração de Si.

A pulverização de folhas de videira com 17mM de silicato de potássio reduziu em 14% o número de colônias de *Uncinula necator*, quando estas foram inoculadas com o patógeno. Esse resultado não foi observado quando o produto foi aplicado via solução nutritiva (1,7 mM de SiO<sub>2</sub>). Entretanto, independentemente do método de aplicação na planta, o Si translocou-se e depositou-se ao redor do apressório do fungo. Os autores notaram efeito do Si na redução da germinação dos conídios de *U. necator*, quando este elemento foi adicionado ao meio de cultura, atribuindo a redução da severidade do oídio da videira à barreira física, dificultando a penetração da hifa do fungo. Esta resistência envolve o movimento lateral de Si e a sua deposição dentro da folha, nos sítios de penetração do fungo (Bowen et al., 1992).

O efeito do Si também foi observado em patossistemas cujo agente etiológico não foi um fungo associado ao sinal de oídio. Em plantas de limão-cravo inoculadas no caule com gomose dos citrus (*Phytophthora nicotianae* pv. *parasitica*) e cultivadas em solução nutritiva suplementada com 100 mg/kg de SiO<sub>2</sub> (1,7 mM de SiO<sub>2</sub>) na forma de silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O), foi

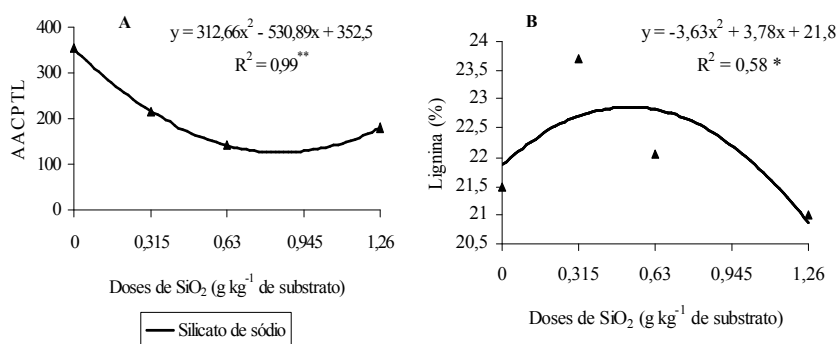
observado menor comprimento de lesões, maior peso de matéria fresca e altura da parte aérea quando as plantas foram comparadas com aquelas não tratadas com Si (Faggiani, 2002). Resultados promissores também foram encontrados por Lima (1998) com a redução da intensidade do cancro-da-haste (*Diaporthe phaseolorum* f. sp. *meridionalis*), em plantas de soja cultivadas em solução nutritiva suplementada com 0, 10, 20, 30, 40, 50, 75 e 100 mg.kg<sup>-1</sup> de Si. Esta autora constatou a redução do número das lesões ocasionadas pelo fungo na planta em até 90% com a adição de 40 mg kg<sup>-1</sup> de Si (0,68 mM de SiO<sub>2</sub>) ao meio. Entretanto, o acúmulo de Si na parte aérea da soja foi dependente da cultivar. Juliatti & Korndörfer (2003), trabalhando com aplicações de wollastonita nas doses 0, 200, 400, 600 e 800 kg.ha<sup>-1</sup> (0, 1,7, 3,4, 5 e 6,7mM de SiO<sub>2</sub>) em casa de vegetação, observaram maior acúmulo de Si na parte aérea da cultivar Savana em comparação com as cultivares Cristalina e FT-Estrela, concluindo que a cultivar Cristalina não é acumuladora nem responsiva a aplicações de Si.

Em cafeeiro observou-se uma redução da cercosporiose com aplicações de Si no substrato para mudas de saquinhos. Santos (2002) adicionando ao substrato silicato de cálcio e silicato de sódio nas doses 0; 0,3; 0,6 e 1,26 g de Si por quilo de substrato (0, 5, 10 e 20mM de SiO<sub>2</sub>), constatou decréscimo linear na incidência e na severidade, avaliadas pelas áreas abaixo da curva de progresso do número de plantas doentes (AACPPD) e do total de lesões (AACPTL) além de aumento na concentração de lignina nas folhas até a dose de 0,52 g de Si ou 8,7mM de SiO<sub>2</sub> (Figura 3).

Para se obter bons resultados do efeito do Si no aumento da resistência de plantas a patógenos, é necessário o suprimento contínuo desse elemento (Bélanger & Menzies, 2003). Pepineiros infectados com *S. fuliginea*, crescendo em meio contendo Si, apresentaram rápida silificação do tecido foliar, principalmente nas bases dos tricomas e ao redor dos pontos de infecção,



aumentando a resistência ao patógeno. Mas, a transferência das plantas para um meio deficiente no elemento não manteve a resistência ao fungo e a silificação do tecido hospedeiro ao redor da hifa, apesar da existência de Si residual na base dos tricomas (Samuels et al., 1991b). De acordo com Chérif et al. (1994a), plantas de pepino inoculadas com *Pythium aphanidermatum*, agente etiológico do tombamento ou “damping-off” e da podridão de raízes, apresentaram redução significativa nos sintomas da doença, quando cresceram em solução nutritiva com 1,7 mM de SiO<sub>2</sub>. Contudo, segundo esses autores, esse resultado deve ser considerado como uma medida preventiva para reduzir tanto os danos ocasionados pelas doenças em plantas quanto a dependência de fungicidas.



**FIGURA 3.** Área abaixo da curva de progresso do número total de lesões (AACPTL) de cercosporiose do cafeeiro (A) e teor de lignina (%) nos tecidos foliares (B), em função das doses de Si aplicadas ao substrato (g.kg<sup>-1</sup> de substrato) (Santos, 2002).

### **2.3.4 Modo de ação do Si na resistência das plantas às doenças**

O modo de ação do Si na resistência das plantas às doenças pode se dar pela formação de barreira física, de barreira química e ou pela alteração na nutrição do hospedeiro.

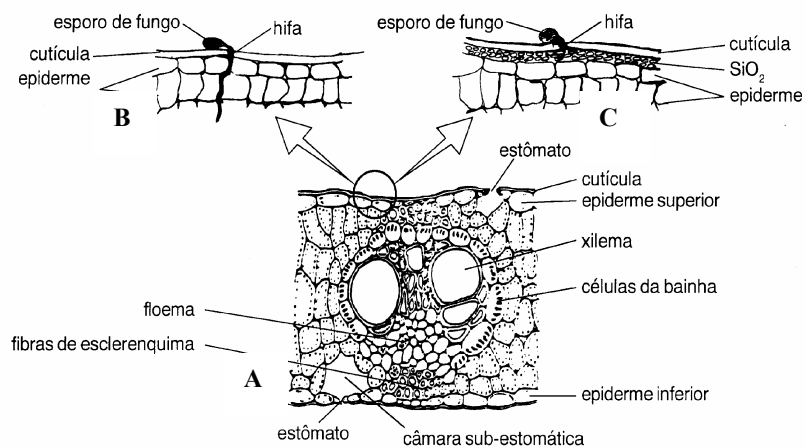
#### **Barreira física**

Muitos trabalhos foram realizados visando esclarecer os possíveis mecanismos pelos quais o Si afeta a suscetibilidade de plantas às doenças. No entanto, estes mecanismos não estão totalmente esclarecidos (Fawe, 2001). O Si solúvel absorvido pelas plantas tende a acumular-se no apoplasto, particularmente na epiderme da parede celular (Epstein, 1994; Marschner, 1995; Samuels et al., 1993). Conforme foi observado por Pozza & Pozza (2003), o fornecimento contínuo de Si à planta enrijeceu a camada cuticular, conforme observações feitas por meio do microscópio eletrônico de varredura, dificultando a penetração via estômatos ou diretamente pela cutícula. Estas observações levaram muitos pesquisadores a sugerir a hipótese de que o Si proporcionaria uma inibição do crescimento das hifas dos fungos através de uma barreira física criada pelo elemento sobre a epiderme (Figura 4), inibindo a penetração do tubo germinativo do fungo (Datnoff et al., 1997; Belanger et al., 1995; Bowen et al., 1992; Pozza & Pozza, 2003; Santos, 2002).

Menzies et al. (1991a) observaram a redução na incidência de oídio em pepineiro devido à adição de Si à solução nutritiva. O sincronismo entre o acúmulo de Si nas folhas e a redução da doença levaram os autores a correlacionarem o aumento da resistência com o fortalecimento da parede celular devido à deposição do Si formando uma eficiente barreira física.

A hipótese sobre a formação de barreira física fundamenta-se na forma

do Si acumular-se nas plantas. Em seu movimento ascendente via apoplasto desde as raízes até as folhas, o Si sofre polimerização nos espaços extracelulares das paredes das células epidérmicas das folhas e dos vasos do xilema (Fawe et al., 2001). O Si depositado nos tecidos da epiderme inibe a invasão das células por hifas dos patógenos.



**FIGURA 4.** A - Corte transversal do limbo foliar de monocotiledônea B - Crescimento de hifa de fungo em tecido sem acúmulo de sílica C - Camada de sílica dificultando o crescimento da hifa (Adaptado de Araújo, 2003).

### Barreira química

O Si pode agir como elemento capaz de induzir mecanismos de defesa da própria planta pela ativação de várias estratégias de defesa, incluindo síntese

de compostos fenólicos e produção de lignina, suberina e calose na parede celular das plantas (Vidhyasekaran, 1997; Menzies et al., 1991b).

Evidências sugerem que o Si poderia ter um papel ativo reforçando a resistência das plantas a doenças por estimular a expressão de reações de defesa naturais da planta. Detecção e análise de compostos antifúngicos em folhas de pepino infectadas levaram à determinação da natureza e estimativa do efeito do Si (Fawe et al., 1998). Alguns destes metabólitos identificados como flavonóides e ácidos fenólicos eram especificamente e fortemente induzidos em um padrão típico de fitotoxinas. Chérif et al. (1994a) observaram rápida ativação das enzimas peroxidase e polifenoloxidase após infecção por *Pythium* spp. em plantas cultivadas em solução nutritiva suplementada com Si.

Análises do processo de infecção do pepineiro pelo oídio, realizadas por Menzies et al. (1991b), indicaram mudanças na expressão de respostas de defesa em células epidérmicas de plantas de pepino tratadas com Si. O número de células infectadas por oídio e o tempo de acúmulo dos compostos fenólicos nas células infectadas foram consideravelmente reduzidos, quando o Si foi retirado do meio, ou seja, com a omissão do fornecimento de Si. Estas observações contestam a hipótese de que somente o Si insolúvel ou polimerizado, presente na papila e na parede celular em contato restrito com o patógeno, confere resistência como barreira física à penetração do fungo; o Si também tem efeito como barreira química.

A lignina gera uma estrutura capaz de proteger e resistir ao ataque microbiano (Epstein, 1999). O Si altera o teor de lignina e reduz a intensidade da cercosporiose do cafeeiro. Santos (2002), adicionando ao substrato de plantio, silicato de cálcio e silicato de sódio nas doses 0; 0,3; 0,6 e 1,26 g de Si.kg<sup>-1</sup> de substrato (0, 5, 10 e 20mM de SiO<sub>2</sub>), constatou decréscimo linear na incidência e na severidade desta doença, avaliadas pelas áreas abaixo da curva de progresso do número de plantas doentes (AACPPD) e do total de lesões (AACPTL). A

adição de Si ao substrato proporcionou aumento da síntese de lignina nas plantas até a dose 0,52 g. kg<sup>-1</sup> de SiO<sub>2</sub>. Esse fato pode ter favorecido a redução da intensidade da cercosporiose nas mudas de cafeeiro. Chérif et al. (1994a), em plantas de pepino infectadas por *Pythium* sp., observaram aumento na atividade de peroxidase e polifenoloxidase, enzimas precursoras na síntese de lignina. A lignina é um importante componente na resistência de plantas a patógenos, pois além da barreira química para sua composição, também limita a ação destes pela formação de barreira física.

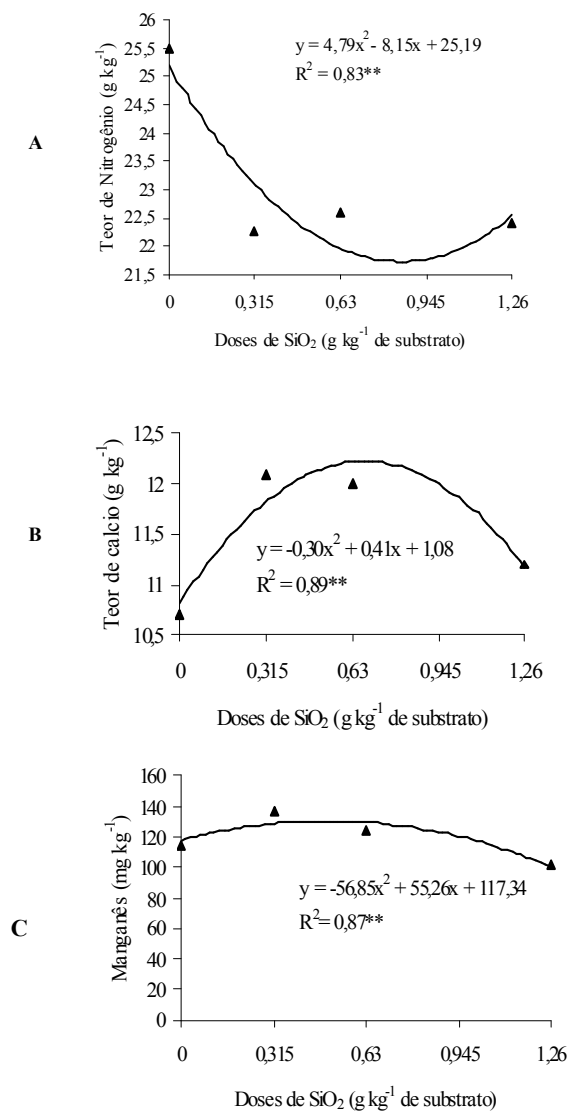
A deposição de calose é induzida pelo tratamento com Si. A porcentagem de calose em tecidos de pepineiro inoculados com *Sphaerotheca fuliginea* foi de 47%, 88% e 100% nos pedaços de folha com baixa (0,05 mM de Si), média (0,5 mM de Si) e alta concentração de Si (2,3 mM), respectivamente (Menziez et al., 1991b).

Trabalhos realizados com trigo no Canadá apresentaram novas evidências do papel ativo do Si na indução de resistência a patógenos fúngicos. Este fator de resistência estimulado pela aplicação do Si foi considerado pelos autores como compostos fenólicos produzidos nas plantas tratadas. Análises citológicas e ultra-estruturais revelaram células da epiderme de plantas tratadas com Si reagindo à infecção do oídio (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*) com reações típicas de defesa, incluindo formação de papila, produção de calose e liberação de “material osmiofílico eletrondenso” identificado citoquimicamente como glicosilato fenólico. Esse material fenólico não somente acumulou próximo da parede celular como também foi associado com a integridade do haustório de maneira similar à localização de fitoalexinas relatados em outros patossistemas (Bélanger et al., 2003). Os autores também sugerem que o papel protetor do Si pode ser semelhante em mono e dicotiledôneas. Nestas últimas o modo de ação exato do Si influenciando a resistência de plantas ainda não foi bem esclarecido.

### **Alteração na nutrição do hospedeiro estimulada por silício**

O Si altera o pH da rizosfera das plantas (Korndörfer & Gascho, 1999), influenciando dessa forma, a absorção de nutrientes essenciais para ativar mecanismos de defesa e barreiras estruturais. Essa característica alcalinizante do elemento, também provocada pelo calcário, deve-se à facilidade de absorção de prótons  $H^+$  que o  $SiO_2$ , presente em quaisquer fontes de Si, possui. O  $SiO_2$  retira prótons  $H^+$  da água do solo para transformar-se em  $Si(OH)_4$ , a molécula silicatada mais estável em solução aquosa (Joly, 1966; Shriver & Atkins, 2003). Em plantas de arroz, o Si estimula fisiologicamente a assimilação do amônio e restringe o aumento de compostos nitrogenados solúveis, incluindo aminoácidos e amidas, que favorecem a propagação das hifas (Takahashi, 1996). Esses compostos nitrogenados, quando absorvidos, no interior do apoplasto, auxiliam o crescimento e o desenvolvimento das hifas dos patógenos.

Em mudas de café em tubetes tratadas com doses crescentes (0, 5, 10 e 20mM de  $SiO_2$ ) de silicato de cálcio e de sódio aplicadas no substrato de plantio, as concentrações de fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), boro (B) e zinco (Zn) não foram influenciadas pelos tratamentos. Porém, a aplicação do  $SiO_2$  ao substrato afetou a disponibilidade de nitrogênio (N), de cálcio (Ca) e de manganês (Mn) para as plantas. Observou-se decréscimo na concentração do N até a dose de 14 mM (0,85 g de  $SiO_2$  por kg de substrato), aumentando em doses mais elevadas (Figura 5A). Maiores teores de Si na folha, em detrimento de menor acúmulo no caule, proporcionaram menores teores de N foliares (Santos, 2002). Resultados semelhantes foram encontrados por Deren (1997), em plantas de arroz adubadas com Si. A concentração de N nas plantas foi significativamente mais alta na testemunha quando comparada aos tratamentos com adição de Si (Figura 5A). Embora tenha reduzido os teores de N nas folhas



**FIGURA 5.** Teores foliares de nitrogênio (A), de cálcio (B) e de manganês (C) em função das doses de Si aplicadas via substrato (Santos, 2002).

e este ser um nutriente essencial para a resposta de defesa da planta, a maior concentração observada ( $25,5\text{g.kg}^{-1}$ ) não foi suficiente para promover o controle da cercosporiose (Pozza et al., 2001), ou seja, a redução da doença se deveu ao Si aplicado e não aos teores de N nas folhas.

As concentrações de cálcio e de manganês nos tecidos foliares foram influenciadas pelas doses de silicato. Ocorreram aumentos nas concentrações de cálcio até a dose  $11\text{mM}$  de  $\text{SiO}_2$  com redução em doses mais altas (Figura 5B), coincidindo com a redução na área abaixo da curva do total de lesões (AACTL). O efeito da nutrição com cálcio na redução da intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro também foi observado por Garcia Júnior et al. (2003). O teor de manganês nas folhas aumentou até a dose de  $8\text{mM}$  de  $\text{SiO}_2$  por kg do substrato, reduzindo-se em seguida (Figura 5C). Com relação à cercosporiose, o manganês afeta a síntese de fenilalanina amônia liase (FAL) e estimula peroxidases requeridas para a biossíntese de lignina (Marschner, 1995), portanto sua deficiência pode ter acarretado a redução do teor de lignina (Figura 3B) e contribuído para o aumento da AACPTL (Santos, 2002).

Plantas de arroz tratadas com Si cultivadas em Neossolo Quartzarênico (NQ) evidenciaram a interação do íon Fe com as fontes solúveis de Si. Após a fase de crescimento, três semanas depois da inundação, as plantas tratadas ficaram amareladas, cloróticas, com sintoma típico de deficiência de Fe. Doses elevadas de silicato de cálcio, wollastonita e termofosfato induziram deficiência de Fe, a qual não pôde ser corrigida por inundação e nem por sete aplicações foliares deste nutriente. Como resultado desta deficiência, as fontes de Si mais solúveis resultaram em maiores teores de Si no solo, mas também nos menores pesos da matéria seca e em menores quantidades absorvidas pela planta (Korndörfer & Gascho, 1999), em função da deficiência de Fe. Entretanto, em casos de excessos de Fe e de Mn, que são comuns em arroz, a adubação silicatada ameniza a toxidez por esses elementos.



### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, M. A. G. de. O silício ganha importância na adubação. Disponível em: <[http://www.manah.com.br/main\\_informativos\\_vegetal\\_silicio.asp](http://www.manah.com.br/main_informativos_vegetal_silicio.asp)>. acesso em: 03 out. 2003.

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

BALASTRA, M. L. F. C.; PEREZ, C. M.; JULIANO, B. O.; VILLAREAL, C. P. Effects of silica level on some properties of *Oryza sativa* straw and hull. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 67, n. 8, p. 2356-2363, Aug. 1989.

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; PRABHU, A. S.; DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H. Importância do silício para a cultura do arroz. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 89, p. 1-8, mar. 2000.

BARTHOLO, G. F. **Desenvolvimento fenológico e produtividade de cultivares de *Coffea arabica* L. sob parcelamentos da adubação**. 2001. 56 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

BÉLANGER, R. R.; BOWEN, P.; EHRET, D. L.; MENZIES, J. G. Soluble silicon: its role in crop and disease management of greenhouse crops. **Plant Disease**, St. Paul, v. 79, n. 4, p. 329-336, Apr. 1995.

BÉLANGER, R. R.; MENZIES, J. G. How does silicon protect plants against disease? Dogma versus new hypothesis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 42., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, 2002. CD-ROM. 2002.

BÉLANGER, R. R.; MENZIES, J. G. Use of silicon to control diseases in vegetable crops. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 28, p. 42-45, 2003. Suplemento.

BÉLANGER, R. R.; BENHAMOU, N.; MENZIES, J. G. Mineral nutrition in the management of plant diseases. **Phytopathology**, St. Paul, v. 93, n. 4, p. 402-412, Apr. 2003.

BOWEN, P.; MENZIES, J. G.; EHRET, D. L. Soluble silicon sprays inhibit powdery mildew development on grape leaves. **Journal American Society Horticultural Science**, Alexandria, v. 117, n. 6, p. 906-912, Nov. 1992.

CARVER, T. L. W.; THOMAS, B. J.; ROBBINS, M. P.; ZEYEN, R. J. Phenylalanine ammonia-lyase inhibition, autofluorescence and localized accumulation of silicon, calcium and manganese in oat epidermis attacked by the powdery mildew fungus *Blumeria graminis* (DC) Speer. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, London, v. 52, n. 4, p. 223-243, Apr. 1998.

CHÉRIF, M.; ASSELIN, A.; BÉLANGER, R. R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. **Phytopathology**, St. Paul, v. 84, n. 3, p. 236-342, Mar. 1994a.

CHÉRIF, M.; BENHAMOU, N.; MENZIES, J. G.; BÉLANGER, R. R. Silicon induced resistance in cucumber plants against *Pythium ultimum*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, London, v. 41, n. 6, p. 411-425, June 1992a.

CHÉRIF, M.; MENZIES, J. G.; BENHAMOU, N.; BÉLANGER, R. R. Studies of silicon distribution in wounded and *Pythium ultimum* infected cucumber plants. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, London, v. 41, n. 5, p. 371-385, May 1992b.

CHÉRIF, M.; MENZIES, J. G.; EHRET, D. L.; BOGDANOFF, C.; BÉLANGER, R. R. Yield of cucumber infect with *Pythium aphanidermatum* when grown with soluble silicon. **Hortscience**, Alexandria, v. 29, n. 8, p. 896-897, Aug. 1994b.

DATNOFF, L. E.; DEREN, C. W.; SNYDER, G. H. Silicon fertilization for disease management of rice in Florida. **Crop Protection**, v. 16, n. 6, p. 525-531, 1997.

DATNOFF, L. E.; RAID, R. N.; SNYDER, G. H.; JONES, D. B. Effect of calcium silicate on bruzone and brown spot intensities and yields of rice. **Plant Disease**, St. Paul, v. 75, n. 7, p. 729-732, July 1991.

DEREN, W. Changes in nitrogen and phosphorus concentrations of silicon-fertilized rice grown on organic soil. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 20, n. 6, p. 765-771, 1997.

DUNCAN, R. R.; BALIGAR, V. C. Genetics and physiological basis of nutrient uptake and use efficiency. In: BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R. (Ed.). **Crops as enhancers of nutrient use**. New York: Academic Press, 1990. p. 3-35.

ECHANDI, E. La Chasparria de los Cafetos causada por el hongo (*Cercospora coffeicola* Berkeley & Cooke). **Turrialba**, San José, v. 9, n. 1, p. 54-67, ene./mai. 1959.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceeding of the National Academy Science**, Washington, v. 91, n. 1, p. 11-17, Jan. 1994.

EPSTEIN, E. Silicon in plants: Facts vs. concepts. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Ed.). **Silicon in Agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2001. p. 1-15.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 641-664, 1999.

EXLEY, C. Silicon in life: A bioinorganic solution to bioorganic essentiality. **Journal Inorganic Biochemical**, v. 69, n. 3, p. 139-44, 1998.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 6-16, jan./abr. 1998.

FAGERIA, N. K.; BALIKAR, V. C. Screening crop genotypes for mineral stresses. In: WORKSHOP ON ADAPTATION OF PLANTS TO SOIL STRESSES, 1993, Lincoln. **Proceedings...** Lincoln: University of Nebraska, 1993. p. 142-159.

FAGGIANI, E. P. **O silício na defesa de limão rugoso (*Citrus jambhiri*) a *Phytophthora nicotianae* pv. *parasitica***. 2002. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba.

FAWE, A.; ABOU-ZAID, M.; MENZIES, J. G.; BÉLANGER, R. R. Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. **Phytopatology**, v. 88, n. 5, p. 396-401, July 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. (Ed.). **Silicon in Agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2001. p. 159-169.

FERNANDEZ-BORRERO, O.; MESTRE, A. M.; DUQUE, S. I. L. Efecto de la fertilización en la incidencia de la mancha de hierro (*Cercospora coffeicola*) en frutos de café. **Cenicafé**, Chinchiná, v. 17, n. 1, p. 5-16, ene./mar. 1966.

FOX, R. L.; SILVA, J. A.; YOUNGE, O. R.; PLUCKNETT, D. L.; SHERMAN, G. D. Soil and plant silicon and silicate response by sugar cane. **Soil Science, Society American Proceedings**, Madison, v. 31, n. 6, p. 775-779, Nov./Dec. 1967.

GARCIA JÚNIOR, D.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A.; SOUZA, P. E.; CARVALHO, J. G.; BALIEIRO, A. C. Incidência e severidade da cercosporiose do cafeeiro em função do suprimento de potássio e cálcio em solução nutritiva. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 3, p. 286-291, maio/jun. 2003.

GASCHO, G. J. Silicon sources for agriculture. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2001. p. 197-208.

HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. Observations on the distribution of mineral elements in the leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). with particular reference to silicon. **Annals of Botany**, London, v. 62, n. 5, p. 463-471, Nov. 1988.

HUBER, D. M. Relationship between mineral nutrition of plants and disease incidence. In: WORKSHOP - RELAÇÃO ENTRE NUTRIÇÃO DE PLANTAS E INCIDÊNCIA DE DOENÇAS, 1., 2002, Piracicaba. **Anais e vídeo...** Piracicaba. Potafos, 2002. CD-ROM. Vídeo 01.

JOLY, W. L. **A química dos não metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1966. 176 p.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silicon in soils, plants and animals. **Advances in Agronomy**, London, v. 19, n. 5, p. 107-149, Nov. 1967.

JULIATTI, F. C.; KORNDÖRFER, G. H.; Uso do silício no manejo integrado de doenças de plantas – experiência brasileira. **Revista Brasileira de Fitopatologia**, Brasília, v. 28, p. 45-52, 3002. Suplemento.

KORNDÖRFER, G. H.; BENEDINI, M.; PAULA, F. B. CHAGAS, R. C. S. Cimento como fonte de silício para cana de açúcar. STAB, Piracicaba, v. 19, n. 2, p. 30-33, 2000.

KORNDÖRFER, G. H.; GASCHO, G. J. Avaliação de fontes de silício para o arroz. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARROZ IRRIGADO, 1., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas, 1999. p. 313-316.

LI, B.; MCKEAND, S. E.; ALLEN, H. L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, n. 2, p. 613-626, June 1991.

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

LIMA FILHO, O. F. de.; LIMA, M. T. G. de.; TSAI, S. M. O Silício na agricultura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 87, n. 87, p. 1-7, mar. 1999.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2001. p. 17-39.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral das plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

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

MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F.; SACRAMENTO, L. V. S. et al. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferentes níveis de fósforo: II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 2, p. 239-244, maio/ago. 1993.

McAVOY, R. J.; BIBLE, B. B. Silica spray reduce the incidence and severity of bract necrosis in poinsettia. **HortScience**, Alexandria, v. 37, n. 7, p. 146-149, Dec. 1996.

McKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils solutions. II The adsorption of monosilicic acid by soil and by other substances. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 43, n. 1, p. 83-96, Mar. 1963.

MELO, B. **Estudos sobre produção de mudas de cafeeiro(*Coffea arabica* L.) em tubetes.** 1999. 119 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition.** Swizerland: International Potash Institute, 1987. 687 p.

MENZIES, J.; BOWEN, P.; EHRET, D. Foliar applications of potassium silicate reduce severity of powdery mildew on cucumber, muskmelon, and zucchini squash. **Journal American Society Horticultural Science**, Alexandria, v. 117, n. 6, p. 902-905, Nov. 1992.

MENZIES, J. C.; EHRET, D. L.; GLASS, A. D. M.; HELMER, T.; KOCH, C.; SEYWERD, F. Effects of soluble silicon on the parasitic fitness of *Sphaerotheca fuliginea* on *Cucumis sativus*. **Phytopathology**, St. Paul, v. 81, n. 1, p. 84-88, Jan. 1991a.

MENZIES, J. G.; EHRET, D. L.; GLASS, A. D. M.; HELMER, T.; KOCH, C.; SEYWERD, F. The influence of silicon on cytological interactions between *Sphaerotheca fuliginea* and *Cucumis sativus*. **Physiology Molecular Plant Pathology**, London, v. 39, n. 4, p. 403-414, Apr. 1991b.

MIGUEL, A. E.; MATIELLO, J. B.; ALMEIDA, S. R. Estudo de efeitos de doses e épocas de aplicação do fungicida sistêmico Triadimefon em aplicações isoladas e associadas com fungicida cúprico no controle da ferrugem do café. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 3., 1975, Curitiba. **Resumos...** Rio de Janeiro, 1975. p. 30-31.

PARRY, D. W.; SMITHSON, F. Types of opaline silica depositions in the leaves of British grasses. **Annals of Botany**, London, v. 28, n. 109, p. 169-185, 1964.

POZZA, A. A. A. **Influência da nutrição nitrogenada e potássica na intensidade da mancha de olho pardo (*Cercospora coffeicola* Berk. & Cook.) em mudas de cafeeiro.** 1999. 70 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

POZZA, A. A. A.; MARTINEZ, H. E. P.; CAIXETA, S. L.; CARDOSO, A. A.; ZAMBOLIM, L.; POZZA, E. A. Influência da nutrição mineral na intensidade da mancha de olho pardo em mudas de cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 1, p. 53-60, jan. 2001.

POZZA, A. A. A.; ZAMBOLIM, L.; POZZA, E. A.; COSTA, H. VALE, F. X. R. Controle químico da mancha de olho pardo (*Cercospora coffeicola*) do cafeeiro em condições de viveiro. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 4, p. 543-545, dez. 1997.

POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A. Manejo de doenças de plantas com macro e micronutrientes. **Revista Brasileira de Fitopatologia**, Brasília, v. 28, p. 52-54, ago. 2003. Suplemento.

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 sugarcane. **Crop Protection**, Oxford, v. 11, n. 1, p. 84-88, Feb. 1992.

RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343 p.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Review**, Cambridge, v. 58, n. 2, p. 179-207, 1983.

RODRIGUES, F. Á. **Fertilização silicatada na severidade da queima-das-bainhas (*Rhizoctonia solani* Kühn) do arroz**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

RODRIGUES, F. Á.; BENHAMOU, N.; DATNOFF, L. E.; JONES, J. B. & BÉLANGER, R. R. Ultrastructural and cytochemical aspects of silicon-mediated rice blast resistance. **Phytopathology**, St. Paul, v. 93, n. 5, p. 535-546, Mar. 2003.

SAMUELS, A. L.; GLASS, A. D. M.; EHRET, D. L.; MENZIES, J. G. Distribution of silicon in cucumber leaves during infection by powdery mildew fungus (*Sphaerotheca fuliginea*). **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 69, n. 1, p. 140-146, Jan. 1991a.

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**, Oxford, v. 14, n. 5, p. 485-492, June 1991b.

SAMUELS, A. L.; GLASS, A. D. M.; EHRET, D. L.; MENZIES, J. G. The effects of silicon supplementation on cucumber fruit: changes in surface characteristics. **Annals of Botany**, London, v. 72, n. 5, p. 433-440, Nov. 1993.

SAMUELS, A. L.; GLASS, A. D. M.; MENZIES, J. G.; EHRET, D. L. Silicon

in cell walls and papillae of *Cucumis sativus* during infection by *Sphaerotheca fuliginea*. **Physiology Molecular Plant Pathology**, London, v. 4, n. 4, p. 237-242, Apr. 1994.

SANDS, R.; MULLIGAN, D. R. Water and nutrient dynamics and tree growth. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 30, n. 1/4, p. 91-111, Feb. 1990.

SANGSTER, A. G. Silicon in the roots of higher plants. **American Journal of Botany**, Columbus, v. 65, n. 9, p. 929-935, Sept. 1978.

SANGSTER, A. G.; PARRY, D. M. Endodermal silification in mature, nodal roots of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Annals of Botany**, London, v. 40, n 116, p. 373-379, 1976.

SANTOS, D. M. dos. **Efeito do silício na intensidade da cercosporiose *Cercospora coffeicola* Berk. & Cooke) em mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDEER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1999.

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

SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W. Química inorgânica. Trad. Maria Aparecida Gomes. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003. 816 p. Tradução de: Inorganic Chemistry.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981.

SWIADER, J. M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F. G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 17, n. 10, p. 1687-1699, 1981.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: \_\_\_\_\_. **Science of the rice plant: physiology**. Food and Agricultural Policy Reserve Center, 1996. v. 2, p. 420-433.



TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan Publishing Company, 1993. 634 p.

VIDHYASEKARAN, P. **Fungal pathogenesis in plant and crops** – molecular biology and host defense mechanisms. New York: Marcel Dekker, 1997. 553 p.

WINSLOW, M. D. Silicon, disease resistance and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. **Crop Science**, Madison, v. 32, n. 5, p. 208-213, Sept./Oct. 1992.

WONG YOU CHEONG, Y.; HEITS, A.; De VILLE, J. Foliar symptoms of silicon deficiency in the sugarcane plant. In: CONGRESS INTERNATIONAL OF THE SOCIETY SUGARCANE TECHNOLOGY, 14., 1972, New Orleans. **Proceedings...** Baton Rouge, 1972. v. 14, p. 766-776.

YOSHIDA, S.; NAVASERO, S. A.; RAMIRES, E. A. Effects of silica and nitrogen supply on some characters of the rice plant. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 31, n. 1, p. 48-56, 1969.

## **CAPÍTULO II**

### **EFEITO DO SILÍCIO NO CONTROLE DA CERCOSPORIOSE EM TRÊS VARIEDADES DE CAFEEIRO**

## 1 RESUMO

POZZA, A. A. A. **Efeito do silício no controle da cercosporiose em três variedades de cafeeiro.** Lavras: UFLA, 2004, Cap. 2, p. 37-51. Tese (Doutorado em Ciência do Solo e Nutrição de Plantas).

A cercosporiose do cafeeiro é uma das mais importantes doenças na fase de viveiro. Os objetivos desse trabalho foram avaliar o efeito da aplicação de Si (1g de  $\text{CaSiO}_3$  incorporado em 1kg do substrato utilizado para encher os tubetes) no controle dessa doença em três variedades de cafeeiro (Catuaí, Mundo Novo e Icatu) e determinar quais os possíveis fatores de resistência associados. As plantas com dois pares de folhas foram inoculadas com suspensão de  $1,4 \times 10^4$  conídios de *Cercospora coffeicola* por ml. Aos sete meses após a inoculação avaliou-se a porcentagem de folhas lesionadas e o número total de lesões por planta. Após essa avaliação, retiraram-se amostras das folhas para o estudo em microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de raios X (MAX). As plantas da variedade Catuaí tratadas com silicato tiveram redução de 63,2% nas folhas lesionadas (%) e de 43% no total de lesões por planta, em relação à testemunha. A MAX e o mapeamento para Si indicaram distribuição uniforme do elemento em toda a superfície abaxial das folhas de cafeeiro nas três variedades tratadas. Nas folhas das plantas não tratadas, o Si foi raramente encontrado. Nas imagens de MEV também foi observada camada de cera bem desenvolvida na superfície inferior das folhas originárias de todas as plantas tratadas, sendo esta mais espessa em Catuaí e rara ou ausente nas não tratadas.

**Palavras-chave adicionais:** mancha-de-olho-pardo, *Coffea arabica*, *Cercospora coffeicola*.

## 2 ABSTRACT

POZZA, A. A. A. **Effect of silicon on the brown eye spot control in three coffee cultivars.** Lavras: UFLA, 2004. Chapter 2. p. 37-51. Thesis (Doctorate in Soils and Plant Nutrition) \*

Brown eye spot of coffee is an important nursery disease. The goal of this work was to evaluate the effect of silicon (1g of  $\text{CaSiO}_3$  incorporated in 1kg of substrate used to filling the containers) on the control of this disease in three coffee cultivars (Catuaí, Mundo Novo and Icatu) and determine which resistance factors were stimulated. Young plants with two pairs of leaves were inoculated with a suspension containing  $1.4 \times 10^4$  *Cercospora coffeicola* conidia.ml<sup>-1</sup>. Seven months after inoculation the plants were evaluated to determine the percent of leaves with disease (%) and the total number of lesions per plant. Before the evaluation, leaf samples were studied using a scanning electron microscope and X-ray microanalysis. In the plants of the Catuaí cultivar treated with silicon, there were observed reduction of 63,2% on the leaves with lesions (%) and of 43% on the total lesions per plant, in relationship the not treated plants. X-ray microanalysis and mapping of Si showed uniform distribution of element in the all abaxial surface of leaves of all cultivars treated. On the leaves of not treated plants, the Si was rare or absent. Scanning electron microscopy also showed a very well developed wax layer on the lower leaf surfaces of all cultivars, but this layer was thicker in the Catuaí cultivar and thin or absent in control plants.

**Additional key words:** brown eye spot, *Coffea arabica*, *Cercospora coffeicola*.

### 3 INTRODUÇÃO

A cercosporiose ou mancha-de-olho-pardo (*Cercospora coffeicola* Berk. & Cooke) é uma das principais doenças da cultura do café no viveiro. As plantas doentes apresentam desfolha, redução no desenvolvimento e raquitismo, tornando-se impróprias ao plantio (Fernandez-Borrero *et al.*, 1966). O principal método de controle da cercosporiose é o químico. No entanto, uma prática alternativa é manejar a nutrição mineral para aumentar a resistência à doença (Marschner, 1995).

Dentre os nutrientes minerais utilizados no manejo de doenças o Si destaca-se por reduzir a severidade de importantes doenças em várias culturas (Epstein, 1999). O Si pode atuar na constituição de barreira física de maneira a impedir a penetração de fungos e afetar os sinais entre o hospedeiro e o patógeno, resultando na ativação mais rápida e extensiva dos mecanismos de defesa pré e pós-formados da planta (Chérif *et al.*, 1992; Chérif *et al.*, 1994; Epstein, 1999). Como função estrutural, proporciona mudanças anatômicas nos tecidos, como células epidérmicas com a parede celular mais espessa devido à deposição de sílica nas mesmas (Blaich & Grundhöfer, 1998), favorecendo a melhor arquitetura das plantas, além de aumentar a capacidade fotossintética e resistência às doenças (Bélanger & Menzies., 2003).

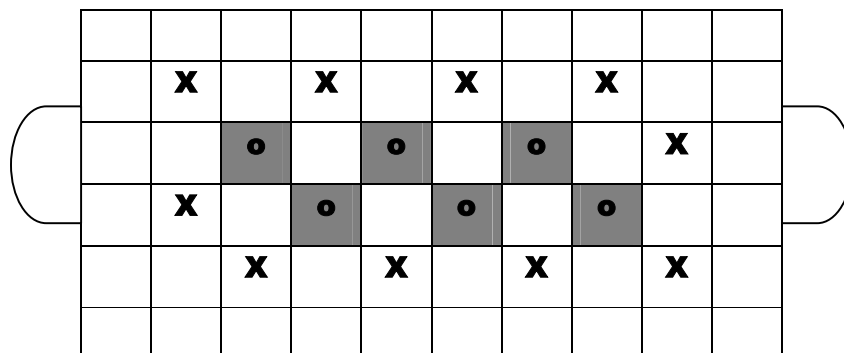
A microanálise de raios X (MAX) é uma técnica utilizada para avaliar e explicar o efeito do Si na resistência das plantas (Lux *et al.*, 2002). Associada a esta, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) também pode trazer importantes informações sobre a formação de barreiras físicas a penetração e colonização dos patógenos.

Tendo em vista esses fatores, os objetivos deste trabalho foram avaliar a eficiência do silicato de cálcio no controle da cercosporiose em mudas de três variedades de cafeeiro e estudar, por meio da MEV e MAX, os mecanismos de resistência envolvidos.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi implantado no viveiro de café da Fazenda Experimental da EPAMIG, Centro Tecnológico do Sul de Minas, Lavras, MG. Foram avaliadas três variedades de café, Catuaí Vermelho - IAC 99, Mundo Novo - IAC 379/19 e Icatu - IAC 2942. Os tratamentos foram: 1g silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ )/ $\text{dm}^3$  de substrato e a testemunha, sem silicato. A fonte de Si utilizada foi silicato de cálcio puro para análise (p.a com 64% de SiO). O substrato foi constituído por 80% de esterco bovino curtido e 20% de terra de subsolo. As plântulas foram obtidas em germinador de areia lavada e transplantadas para os tubetes no estágio de "palito de fósforo".

O experimento foi conduzido em delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial de três variedades combinadas com duas adubações (com e sem Si) e quatro repetições. As parcelas foram constituídas por 16 tubetes de  $120 \text{ cm}^3$ , considerando-se como parcela útil os seis centrais (Figura 1). Após o transplântio foi feita a adubação com 0,75g de fertilizante de liberação lenta (formulação 15-10-10 de NPK + micronutrientes) por tubete.



**FIGURA 1** Esquema de distribuição das plantas úteis (●) na parcela experimental (X), contida na bandeja com os tubetes.

Ao atingirem dois pares de folhas definitivas, as mudas de cafeeiro foram inoculadas com a suspensão de  $1,4 \times 10^4$  conídios/ml, segundo metodologia utilizada por Pozza (1999). O número de folhas doentes (%) e o total de lesões de *C. coffeicola* foram avaliados antes da coleta de amostras para observação em MEV, quando as mudas encontravam-se com sete meses de idade.

A preparação e a observação em MEV (DSM940 - Zeiss, acoplado ao sistema de microanálise de raios-X: EDS - OXFORD INSTRUMENT Link ISIS) foram realizadas no NAP/MEPA da ESALQ/USP. Para tanto, foram retiradas folhas do terceiro par do ramo ortotrópico, contadas partindo do ápice para a base, de cinco mudas de cafeeiro, dos tratamentos com as doses zero e 1,0 g de  $\text{CaSiO}_3/\text{dm}^3$  de substrato, para cada variedade. De cada folha amostrada, foram retirados dois fragmentos do limbo foliar (3 x 3mm cada), os quais foram preparados para observação em MEV. Os dez espécimes obtidos para cada tratamento foram montados em suportes de alumínio “stubs”, com o auxílio de fita adesiva de carbono dupla face, sendo cinco com a face inferior do limbo voltada para cima e cinco para baixo. Em seguida foram cobertos com ouro e observados em MEV. Todos os espécimes montados foram observados e quatro imagens da superfície de cada amostra foram geradas e registradas digitalmente, ao acaso, nas condições de 20 kv e distância de trabalho de 9mm. Destas imagens, foram selecionadas duas de cada variedade, as quais foram preparadas no Software Photopaint® do pacote Corel Draw 9®.

Dez fragmentos, também de  $9\text{mm}^2$ , do limbo foliar, das mesmas folhas utilizadas para a observação em MEV, foram preparados para a microanálise de raios X (MAX). Cortaram-se os dez fragmentos, tendo metade deles sido montados em suportes de alumínio com a face superior voltada para cima e, a outra metade com a face inferior voltada para cima. Estes espécimes foram levados para dessecador contendo sílica gel, onde permaneceram por 24 horas.

Em seguida, foram levados ao aparelho “sputtering” (MED 010, Balzer) e cobertos com uma fina camada de carbono para serem observados em MEV com distância de trabalho 25mm e 20kv. Após análise dos elementos presentes nas amostras procedeu-se o mapeamento para Si na área analisada, utilizando o Software ISIS<sup>®</sup>. Estas metodologias utilizadas para observação em MAX e em MEV foram desenvolvidas pelo Prof. Eduardo Alves, no Laboratório de Microscopia eletrônica do CENA/ESALQ-USP.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram observadas interações significativas entre as variedades e a presença de Si em relação à intensidade da doença. As plantas da variedade Catuaí com Si incorporado ao substrato apresentaram 63,2% menos folhas lesionadas e 43% menos lesões, quando comparadas à testemunha. Também houve diferença significativa entre as variedades; a Catuaí e a Mundo Novo apresentaram maior número médio de folhas doentes e lesões por planta do que Icatu (Tabela 1). Segundo Matiello & Almeida (1997), a variedade Icatu apresenta maior resistência à cercosporiose. Conforme Marschner (1995), plantas moderadamente resistentes ou suscetíveis à doença respondem melhor à nutrição e conseqüentemente à aplicação de Si. Dessa forma, as respostas da variedade Icatu e da Mundo Novo, em termos de redução de folhas lesionadas e do total de lesões por plantas, foram menores do que a resposta proporcionada pelo Si na variedade Catuaí (Tabela 1). Rodrigues *et al.* (2001) também encontraram menores respostas à aplicação de  $\text{CaSiO}_3$  nas variedades resistentes, para o controle da rizoctoniose de arroz (*Rhizoctonia solani* Khun.).

O efeito do Si no controle de doenças em várias culturas foi relatado tanto em mono quanto em dicotiledôneas. Para o cafeeiro, esse efeito ainda não



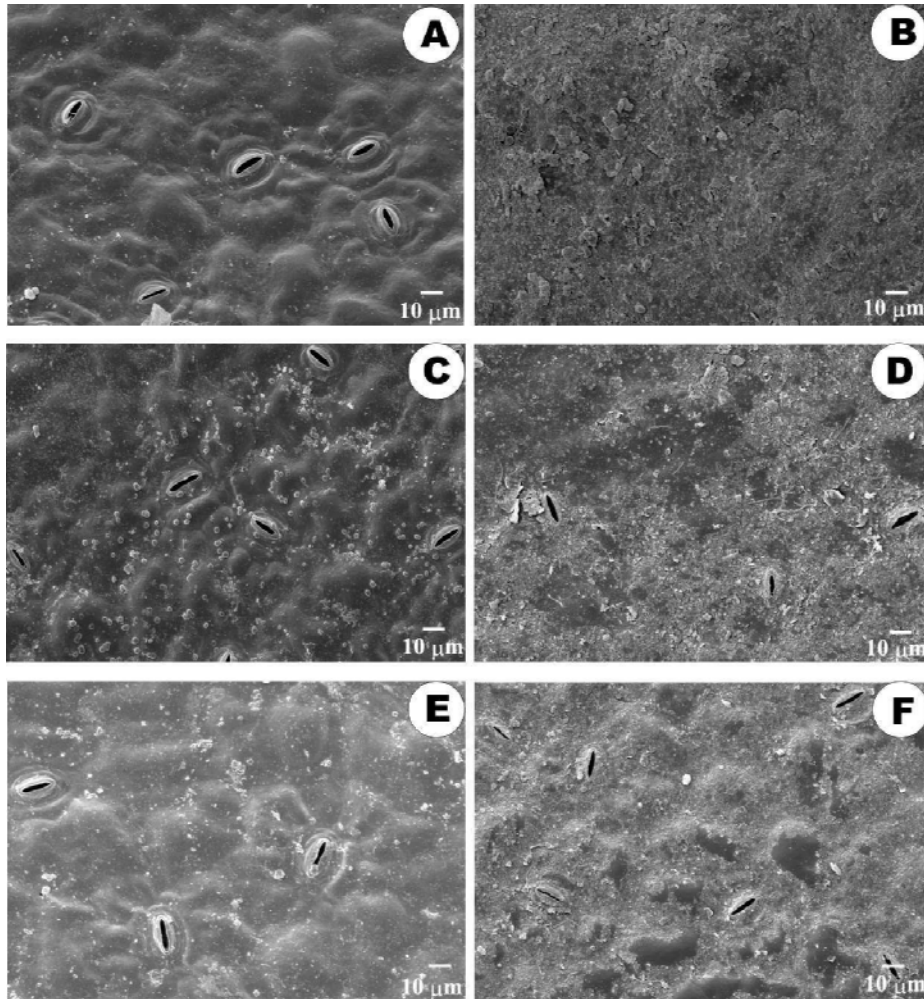
foi bem elucidado. Os mecanismos pelos quais o Si pode conferir resistência à determinada doença podem ser por acúmulo do elemento na parede das células da epiderme e cutícula, acúmulo no local de penetração do patógeno (barreiras estruturais) ou ativação das barreiras químicas e bioquímicas da planta (Epstein, 1999).

**TABELA 1** Porcentagem de folhas lesionadas e número total de lesões (*C. coffeicola*) por planta de cafeeiro das variedades Catuaí, Mundo Novo e Icatu produzidas em tubetes, com e sem incorporação do silicato de cálcio ao substrato de plantio.

Variedade	Folhas lesionadas por planta (%)			Total de lesões por planta		
	Com silic.	Sem silic.	Média	Com silic.	Sem silic.	Média
Catuaí	16,0 a	25,3 b	20,6B	18,8 a	43,3 b	31,1B
M. Novo	22,9 <sup>ns</sup>	23,3 <sup>ns</sup>	23,1B	24,2 <sup>ns</sup>	30,5 <sup>ns</sup>	27,4B
Icatu	14,5 <sup>ns</sup>	16,0 <sup>ns</sup>	15,3A	13,3 <sup>ns</sup>	21,8 <sup>ns</sup>	9,1A

<sup>ns</sup> não significativo. Letras iguais minúsculas nas linhas e maiúsculas na coluna não diferem entre si (Tukey, 5%).

Por meio de MEV, observou-se a presença de uma cutícula mais espessa na superfície inferior da folha das plantas tratadas com Si, principalmente devido à camada de cera epicuticular mais desenvolvida. Essa camada de cera epicuticular em algumas amostras, principalmente de Catuaí, cobriu parcialmente os estômatos (Figuras 2B, 2D e 2F), enquanto que, nas testemunhas, os estômatos puderam ser observados com clareza (Figuras 2A, 2C e 2E). Embora não tenha sido mensurado nesse experimento, devido ao fato dos

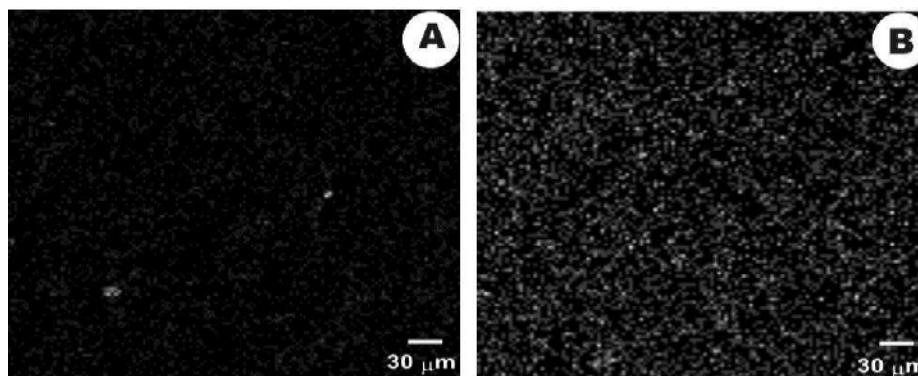


**FIGURA 2** Superfície inferior de folhas de plantas das variedades Catuaí (A-B), Mundo Novo (C-D) e Icatu (E-F) de cafeeiro, tratadas com  $\text{CaSiO}_3$  (B, D e F) e não tratadas (A, C, e E). Foto: Eduardo Alves, 2003.

estômatos estarem pouco visíveis, ou parcialmente tampados pela camada epicuticular, nas plantas em que o silicato foi incorporado ao substrato, concluiu-se que houve maior espessamento dessa camada, pois os estômatos encontravam-se bem mais visíveis nas plantas não tratadas (Figura 2A, 2C, e 2F). Portanto, dentre as variedades, a Catuaí apresentou camada de cera epicuticular mais espessa (Figura 2B). Essa camada pode ter tornado a superfície hidrofóbica (apolar), impedindo a formação de um filme de água, o que é importante para os processos vitais da patogênese como a germinação e a penetração, além de permitir o acúmulo de substâncias antifúngicas na cutícula. Pascholati & Leite (1995) citaram vários exemplos de patossistemas nos quais a espessura da cutícula teve efeito sobre a penetração de fungos. Portanto, a cutícula mais espessa com a camada de cera epicuticular mais desenvolvida observada neste estudo pode explicar em grande parte a redução no número de lesões de *C. coffeicola* nas variedades Mundo Novo e Catuaí, fato ainda não verificado em outros experimentos com aplicação de Si.

Pela microanálise de raios X, na face inferior das folhas verificou-se maior quantidade de Si nas folhas de plantas tratadas do que nas não tratadas, estando o Si ausente nestas últimas. Quando se procedeu ao mapeamento para Si, verificou-se distribuição uniforme do Si na superfície da área analisada das folhas tratadas. Na testemunha, o Si foi encontrado de forma localizada, possivelmente por contaminação do material (Figura 3).

A polimerização de Si na superfície inferior da folha, processo denominado silicificação, é comum em gramíneas (Lux et al., 2002) e pode ocorrer em dicotiledôneas (Epstein, 1999), porém, até então, não havia sido verificado em cafeeiro. Foi observado, por meio da MAX, que o Si encontrava-se posicionado principalmente na epiderme, pois, quando as áreas com pouca cera epicuticular foram analisadas, o teor do elemento foi detectado em menor

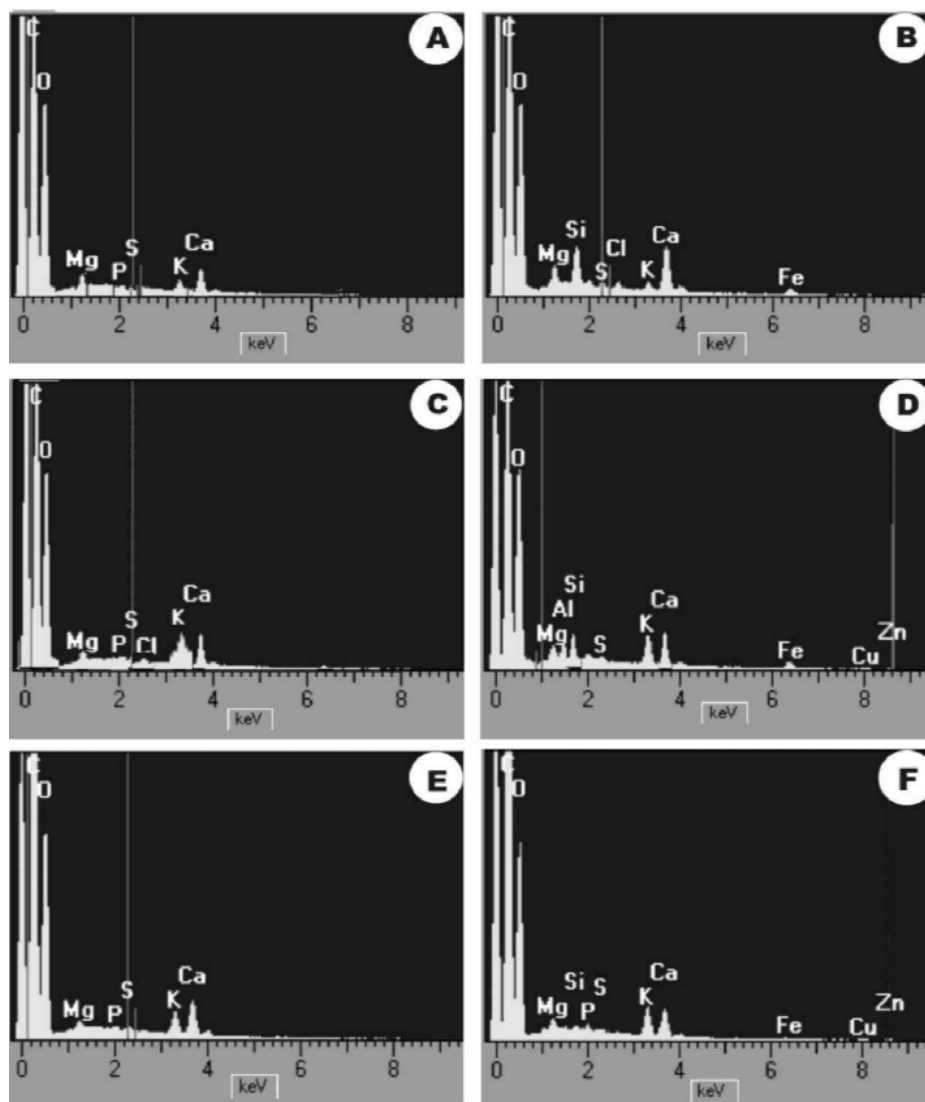


**FIGURA 3** Mapeamento para Si da área do limbo foliar de folhas de mudas de cafeeiro, variedade Catuaí, mostrando uma menor presença e distribuição mais concentrada do elemento em folha de planta não tratada (A) e maior presença e distribuição mais uniforme em folha de planta tratada com  $\text{CaSiO}_3$  (B). Foto: Eduardo Alves, 2003.

quantidade. Em corte transversal da folha, a quantidade de Si detectada foi mínima e praticamente igual à da testemunha. Em áreas da superfície inferior da folha de onde a cutícula foi retirada, ainda verificou-se a presença de Si quando se procedeu ao mapeamento (dados não apresentados). A presença deste elemento na camada externa da epiderme foi observada por Carver et al. (1987). Uma característica própria do  $\text{Si(OH)}_4$  é a facilidade que parte do  $\text{Si}^{+4}$  tem de sair do estado de coordenação quatro (tetraédrica) e assumir uma coordenação seis (octaédrica). O composto hexacoordenado  $[(\text{H}_2\text{O})\text{Si(OH)}_5]^-$  é o ponto de partida para a polimerização. A polimerização, que precede a precipitação, é causada pela combinação de unidades de  $[(\text{H}_2\text{O})\text{Si(OH)}_5]^-$ . Haverá precipitação quando polímeros de  $[(\text{H}_2\text{O})\text{Si(OH)}_5]^-$  combinarem-se com monômeros (solúveis) de  $\text{Si(OH)}_4$  (McKeague & Cline, 1963 a e b; Iler, 1979). Esses

autores também observaram que a complexação do silício com compostos fenólicos na parede das células da epiderme pode reduzir e dificultar a expansão das lesões, bem como a intensidade de doença, por tornar as células mais rígidas, fato verificado mais recentemente por Rodrigues et al. (2001). Considerando a facilidade de formação do complexo octaédrico  $[(H_2O)Si(OH)_5]^-$  parece razoável admitir a substituição de parte dos grupamento  $(OH)^-$  por fenóis nas moléculas do complexo ou a própria combinação intermolecular da espécie  $[(H_2O)Si(OH)_5]^-$  com os compostos fenólicos (Prof. Ruy Carvalho DQI/UFLA – comunicação pessoal). Essas constatações podem afetar a epidemiologia da doença, tanto por reduzir a penetração quanto por contribuir para menor esporulação do fungo.

Além do Si, as amostras tratadas apresentaram maior quantidade de Fe e a presença de Zn e Cu, a qual não foi verificada nas testemunhas (Figuras 4A-4F). Além da ação antifúngica (Marschner, 1995), esses micronutrientes podem atuar como co-fatores na síntese de enzimas, inclusive naquelas ligadas à patogênese, tornando-se mais uma evidência da atuação destas substâncias no processo de defesa da planta. O maior acúmulo desses micronutrientes, nas folhas pode estar associado com a indução da resistência sistêmica (Bélanger & Menzies, 2003) e contribuir para a melhor nutrição das mudas. Essa resistência foi observada em arroz e em pepino devido à produção de fitoalexinas e compostos fenólicos em plantas tratadas com Si (Fawe *et al.*, 1998; Seebold *et al.*, 2000). Outro efeito do Si é o da ativação das defesas químicas e bioquímicas da planta, aumentando o conteúdo de fenóis e a atividade das enzimas quinase, peroxidase, glicosidase, fenilamonialase e polifenoloxidase (Fawe *et al.*, 1998; Rodrigues *et al.*, 2001; Bélanger & Menzies, 2003), as quais não foram analisadas neste estudo. Essas análises, em trabalhos futuros, poderiam contribuir para explicar a redução do número de lesões ocorrida nas variedades Catuaí e Mundo Novo.



**FIGURA 4** Microanálise de raios X da superfície inferior de folhas das variedades de cafeeiro (A-F) Catuaí (A-B), Mundo Novo (C-D) e Icatu (E-F). Microanálise de folhas de planta não tratadas (A, C e E) e de folhas de plantas tratadas (B, D e F) com  $\text{CaSiO}_3$ . Foto: Eduardo Alves, 2003.

## 6 CONCLUSÕES

O Si promoveu a formação de barreira física e química em mudas de cafeeiro, principalmente na variedade Catuaí. A barreira física foi formada pela camada de cera inibindo fisicamente a penetração da *C. coffeicola* e a química foi dada pelo maior acúmulo de micronutrientes na parte aérea, aumentando a defesa imunológica das mudas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BÉLANGER, R. R.; MENZIES, J. G. Use of silicon to control diseases in vegetable crops. **Revista de Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 28, p. 42-45, ago. 2003. Suplemento.
- BLAICH, R.; GRUNDHÖFER, H. Silicate incrusts induced by powdery mildew in cell walls of different plant species. **Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz**, Stuttgart, v. 105, n. 2, p. 114-120, Mar. 1998.
- CARVER, T. L. W.; ZEYEN, R. J.; AHLSTRAND, G. G. The relationship between insoluble silicon and success or failure of attempted primary penetration by powdery mildew (*Erysiphe graminis*) germinating on barley. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, London, v. 31, n. 1, p. 133-148, July 1987.
- CHÉRIF, M.; ASSELIN, A.; BÉLANGER, R. R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. **Phytopathology**, Sst. Paul, v. 84, n. 3, p. 236-242, Mar. 1994.
- CHÉRIF, M.; BENHAMOU, N.; MENZIES, J. G.; BÉLANGER, R. R. Silicon induced resistance in cucumber plants against *Pythium ultimum*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, London, v. 41, n. 6, p. 411-425, June 1992.
- EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 641-664, 1999.
- FERNANDEZ-BORRERO, O.; MESTRE, A. M.; DUQUE, S. I. L. Efecto de la fertilizacion en la incidencia de la mancha de hierro (*Cercospora coffeicola*) en frutos de café. **Cenicafé**, Chinchina, v. 17, n. 1, p. 5-17, ene./mar. 1966.

- FAWE, A.; ABOU-ZAID, M.; MENZIES, J. G.; BÉLANGER, R. R. Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. **Phytopathology**, St. Paul, v. 88, n. 5, p. 396-401, May 1998.
- ILER, R. K. **The chemistry of silica**. New York: John Wiley, 1979. 400 p.
- LUX, A.; LUXOVA, M.; HATTORI, T.; INANAGA, S.; SUGIMOTO, Y. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. **Physiologic Plantarum**, Copenhagen, v. 115, n. 1, p. 87-92, May 2002.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. New York: Academic Press, 1995.
- MATIELLO, J. B.; ALMEIDA, S. R. **Variedades de café** – como escolher, como plantar. Rio de Janeiro: MAA/SDR/PROCAFÉ, 1997.
- McKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils solutions. **Advances in Agronomy**, New Yoek, v. 15, n. 1, p. 339-396, 1963a
- McKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils solutions. I The form and concentration of dissolved silica in aqueous extracts of some soils. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 43, n. 1, p. 70-82, Mar. 1963b.
- PASCHOLATI, S. F.; LEITE, B. Hospedeiros: mecanismos de resistência. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H, AMORIN, L. (Ed.). **Manual de fitopatologia** – princípios e conceitos. São Paulo: Ceres. 1995. p. 417-453.
- POZZA, A. A. A. **Influência da nutrição nitrogenada e potássica na intensidade da mancha de olho pardo (*Cercospora coffeicola* Berk. & Cook.) em mudas de cafeeiro**. 1999. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- RODRIGUES, F.; DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H.; SEEBOLD, K. W.; RUSH, M. C. Effect of silicon and host resistance on sheath blight development in rice. **Plant Disease**, St. Paul, v. 85, n. 8, p. 827-832, Aug. 2001.
- SEEBOLD, K. W.; DATNOFF, L. E.; CORREA-VICTORIA, F. J.; KUCHAREK, T. A.; SNYDER, G. H. Effect of silicon rate host resistance on blast, scald, and yield of upland rice. **Plant Disease**, St. Paul, v. 84, n. 8, p. 871-876, Aug. 2000.



### **CAPÍTULO III**

## **EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DAS VARIEDADES DE CAFEIEIRO ADUBADAS COM SILÍCIO**

## 1 RESUMO

POZZA, A. A. A. **Eficiência nutricional das variedades de cafeeiro adubadas com silício**. Lavras: UFLA, 2004. Cap. 3 p. 52-81. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).

Embora não seja considerado nutriente essencial às plantas, o silício é classificado como elemento benéfico ou útil podendo alterar a dinâmica nutricional das variedades de cafeeiro cada vez mais produtivas. Objetivando comparar a eficiência nutricional de variedades de cafeeiro (Catuaí, Mundo Novo e Icatu) em resposta à adubação silicatada, implantou-se um experimento em DIC, com mudas de três variedades combinadas com seis doses de silicato de cálcio (T0=0, T1=0,0625, T2=0,125, T3=0,25, T4=0,5 e T5=1,0g de  $\text{CaSiO}_3/\text{dm}^3$  de substrato). A variedade Icatu teve maior eficiência de absorção (EA) de Cu, Zn Fe e Si, maior eficiência de utilização (EU) de N, K, Ca B e Mn não diferindo da Mundo Novo para os nutrientes N, Ca e Mn e maior ET de N, S, Zn e de Fe. A Catuaí teve maior EA de P, K, B e Mn, não diferindo da Mundo Novo para os nutrientes P, K e Mn, maior EU para Mg, S, Cu, Zn, Fe e Si, provavelmente devido à melhor eficiência de translocação (ET) destes nutrientes menos para Fe e Si. A Mundo Novo foi mais eficiente na absorção de N, K, Ca, Mg, Mn e Si, teve maior EU de P e Mn e maior ET de K, Ca, B, Mn e Si. A adubação com silicato alterou a eficiência nutricional das variedades de cafeeiro.

**Palavras-chave adicionais:** eficiência de translocação, eficiência de absorção e eficiência de utilização, *Coffea arabica*, nutrição, adubação.

## 2 ABSTRACT

POZZA, A.A.A. **Nutritional efficiency of coffee cultivars fertilized with silicon.** Lavras: UFLA, 2004. Chapter 3. p. 52-81. Thesis (Doctorate in Soils and Plant Nutrition).

The silicon is classified as useful element, which can alter the nutritional dynamics of more productive coffee cultivars, although it is not considered an essential nutrient to plants. In this way, an experiment was conducted in a totally randomized design, with plants of three cultivars combined with six doses of calcium silicate (T0=0, T1=0.0625, T2=0.125, T3=0.25, T4=0.5, and T5=1.0g of CaSiO<sub>3</sub>/dm<sup>3</sup> of substrate), aiming to compare the nutritional efficiency of coffee cultivars (Catuaí, Mundo Novo and Icatu) in terms of response to Si-fertilization. The Icatu cultivar had more efficiency of uptake (EA) of Cu, Zn, Fe, and Si, and more efficiency of utilization (EU) of N, K, Ca, B, and Mn, not differing from Mundo Novo cultivar for N, Ca, and Mn, and having more efficiency of translocation (ET) for N, S, Zn, and Fe nutrients. The Catuaí had more EA of P, K, B, and Mn, not differing from Mundo Novo for P, K, and Mn, higher EU for Mg, S, Cu, Zn, Fe, and Si, probably because of a better ET of these nutrients with exception of Fe and Si. The Mundo Novo was more efficient in N, K, Ca, Mg, Mn and Si uptake, had higher EU of P and Mn, and higher ET of K, Ca, B, Mn, and Si. The fertilization with silicate altered the nutritional efficiency of coffee cultivars.

**Additional key words:** translocation efficiency, uptake efficiency, utilization efficiency, *Coffea arabica*, nutrition, and fertilization.

### 3 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da agricultura moderna é a utilização de estratégia de adaptação de plantas a solos de baixa fertilidade. Nestes casos, existem duas alternativas: elevar a fertilidade dos solos pelo uso de corretivos e fertilizantes ou empregar variedades nutricionalmente eficientes. O conceito de eficiência de plantas na utilização de um nutriente engloba processos pelos quais elas absorvem, translocam, acumulam e utilizam melhor este nutriente para a produção de matéria seca ou grãos, em condições nutricionais normais ou adversas. A exigência nutricional e o crescimento das plantas variam de acordo com a espécie e a cultivar (Fageria, 1998; Martinez et al., 1993), dependendo da sua eficiência de absorção (Swiader et al., 1994; Sands & Mulligan, 1990; Duncan & Baligar, 1990), de translocação (Li et al., 1991; Duncan & Baligar, 1990) e de uso dos nutrientes (Siddiqi & Glass, 1981; Sands & Mulligan, 1990; Duncan & Baligar, 1990).

Vários mecanismos relacionados às características morfológicas e fisiológicas da planta contribuem para o uso eficiente de nutrientes, tais como: sistema radicular extensivo (que possibilita a exploração de maior volume de solo), alta relação entre raízes e parte aérea, habilidade do sistema radicular em modificar a rizosfera (possibilitando superar baixos níveis de nutrientes), maior eficiência de absorção ou de utilização de nutrientes, capacidade de manter o metabolismo normal com baixo teor de nutrientes nos tecidos e alta taxa fotossintética (Fageria & Baligar, 1993).

A crescente demanda de nutrientes por variedades de café, cada vez mais produtivas, assim como a expansão de lavouras de café para solos de baixa fertilidade exige melhor compreensão da dinâmica dos nutrientes nessa cultura, evitando-se assim problemas de deficiência nutricional, altamente prejudiciais aos programas de adubação (Reis Jr. & Martinez, 2002).

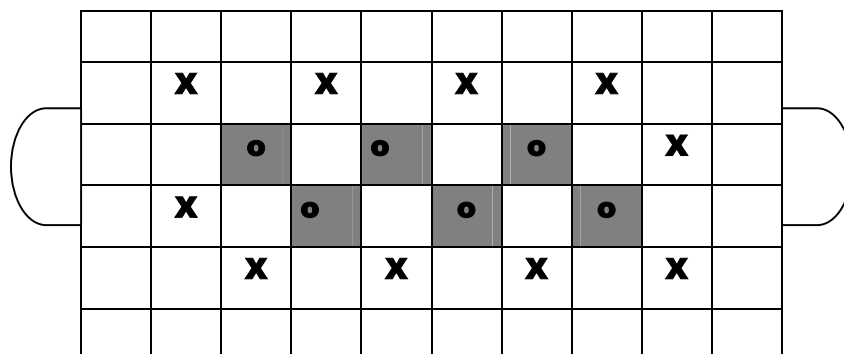
Embora não seja considerado nutriente essencial às plantas, o silício é classificado por muitos autores como elemento benéfico ou útil devido aos efeitos positivos observados, como: favorecer uma melhor arquitetura das plantas, reduzir a suscetibilidade ao estresse hídrico, aumentar a taxa fotossintética, além de alterar o pH da rizosfera das plantas. Mesmo sem possuir função fisiológica e nutricional, trabalhos indicam que o Si afeta o estado nutricional das culturas, como o cafeeiro (Santos, 2002) e o arroz (Korndörfer & Gascho, 1999; Ma & Takahashi, 1990). Dessa forma, acredita-se que influencie a absorção de nutrientes essenciais e a eficiência nutricional das plantas.

Tendo em vista esses fatores, o objetivo deste trabalho foi comparar a eficiência de absorção, de translocação e de utilização dos nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Zn, Fe, Mn e Si entre variedades de cafeeiro e o efeito de doses de silício na eficiência nutricional destas variedades.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi implantado no viveiro de produção de mudas em tubetes da Fazenda Experimental da EPAMIG, Centro Tecnológico do Sul de Minas, Lavras, MG. Foram avaliadas três variedades de café, Catuaí Vermelho - IAC 99, Mundo Novo - IAC 379/19 e Icatu - IAC 2942. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial (3 X 6) de três variedades (Catuaí, Mundo Novo e Icatu) combinadas com seis doses de Si (T0=0, T1=0,0625, T2=0,125, T3=0,25, T4=0,5 e T5=1,0g de  $\text{CaSiO}_3/\text{dm}^3$  de substrato) com quatro repetições. A fonte de Si utilizada foi silicato de cálcio puro para análise (p.a com 64% de SiO). As parcelas foram constituídas por 16 tubetes de  $120 \text{ cm}^3$ , considerando-se como parcela útil os seis centrais (Figura 1). A composição do substrato base, 80% de esterco e 20% de terra de subsolo,

foi realizada utilizando-se um recipiente graduado. Os constituintes do substrato foram colocados em saco plástico, com capacidade para 60 litros, que foi movimentado para homogeneizar a mistura. As doses de Si foram adicionadas aos tratamentos e homogeneizadas pelo mesmo processo, por cerca de 2 minutos. Retiraram-se amostras para análise química e física (Tabela 1). Após o enchimento dos recipientes e umedecimento do substrato por meio de uma irrigação, foi realizado o transplântio, utilizando-se plântulas das três variedades de cafeeiro, no estágio de "palito de fósforo". As plântulas foram obtidas da semeadura em bandejas plásticas contendo areia lavada e foram colocadas em casa de vegetação até atingirem o estágio desejado. Após o transplântio foi feita a adubação com 0,75 g de fertilizante de liberação lenta (formulação 15-10-10 de NPK + micronutrientes) por tubete.



**FIGURA 1** Esquema de distribuição das plantas úteis (●) na parcela experimental (X), contida na bandeja com os tubetes.

**TABELA 1** Atributos químicos e condutividade elétrica dos substratos constituídos por esterco de curral + terra de subsolo com as doses de silício T0=0, T1=0,0625, T2=0,125, T3=0,25, T4=0,5 e T5=1,0g de CaSiO<sub>3</sub>/dm<sup>3</sup> de substrato. Laboratório de Solos da UFLA, 2001.

<b>Atributos</b>	<b>T0</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>
pH em água	6,4	6,7	6,8	6,8	6,8	6,9
P <sub>Merlich-1</sub> (mg/dm <sup>3</sup> )	468,6	431,9	387,6	431,9	468,6	387,6
K (mg/dm <sup>3</sup> )	1038	1038	1038	1038	1038	1045
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	6,0	7,0	6,4	6,3	6,6	5,7
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	6,4	5,5	5,0	5,4	5,3	4,8
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
H+Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	1,3
S (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	15,1	15,2	14,1	14,4	14,6	13,2
(t) (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	15,1	15,2	14,1	14,4	14,6	13,2
(T) (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	16,8	16,9	15,6	15,9	16,1	14,5
V %	89,9	89,9	90,4	90,5	90,7	91,0
m %	0	0	0,0	0	0	0
MO (dag/kg)	9,2	10,3	10,3	10,0	10,3	8,7
P-rem (mg/L)	41,6	44,0	44,0	41,6	26,8	28,7
Zn(mg/dm <sup>3</sup> )	19,0	27,7	22,9	24,5	25,6	21,5
Fe (mg/dm <sup>3</sup> )	216,4	214,3	195,3	184,3	228,7	183,9
Mn (mg/dm <sup>3</sup> )	73,2	77,0	69,9	72,0	75,2	65,5
Cu (mg/dm <sup>3</sup> )	2,7	2,6	2,2	2,3	2,5	2,0
B (mg/dm <sup>3</sup> )	0,9	0,7	0,7	0,7	0,8	1,1
S (mg/dm <sup>3</sup> )	74,6	80,4	69,6	106,9	131,0	134,7
Cond.Elét (ds/m)	3,37	3,02	2,81	2,98	3,30	3,81

pH em água 1:2,5; P, Na, K, Fe, Mn e Cu – extrator Mehlich 1; Ca, Mg e Al – extrator: KCl 1mol/L; H + Al – extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L – pH 7,0; B – extrator água quente; S – extrator fosfato monocálcico em ácido acético; SB – soma de bases trocáveis; CTC (t) – capacidade de troca catiônica efetiva; CTC (T) – capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V - índice de saturação de bases; m - índice de saturação por Al; MO – matéria orgânica – C. Org. x 1,724 – Walkley-Black; P-rem – fósforo remanescente.

Aos sete meses de idade, as plantas foram colhidas, separadas em parte aérea e raízes, secas em estufa (70°C) até atingirem peso constante, quando se obteve a biomassa de cada uma das partes. Os tecidos vegetais foram triturados

em moinho tipo Wiley e as amostras destinadas às análises. O silício nos tecidos vegetais foi analisado segundo os métodos proposto por Gallo & Furlani (1978). Para determinar os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Zn, Fe e Mn, seguiram-se os métodos descritos por Malavolta et al. (1997). Para o estudo da eficiência nutricional foram utilizados conceitos propostos por diversos autores e apresentados na Tabela 2.

**TABELA 2** Modelos de eficiência nutricional utilizados no presente trabalho

<b>Eficiências</b>	<b>Modelos</b>	<b>Autores</b>
Eficiência de utilização	$\frac{(\text{Matéria seca total})^2}{\text{Conteúdo na matéria seca total}}$	Siddiqi & Glass (1981)
Eficiência de absorção	$\frac{\text{Conteúdo total absorvido}}{\text{Matéria seca da raiz}}$	Swiader et al. (1994)
Eficiência de translocação	$\frac{\text{Conteúdo na parte aérea}}{\text{Conteúdo na planta toda}} \times 100$	Li et al. (1991)

Foi realizada a análise de variância dos resultados. Em relação às doses de silício foi empregada a análise de regressão para constatar a dose de silício que promoveu as melhores eficiências nutricionais. Foi realizado o teste de Scott & Knott para comparar as variedades. O processamento dos dados foi feito utilizando-se o programa SISVAR. Escolheu-se o modelo de regressão que pudesse ser explicado biologicamente e testaram-se os coeficientes das equações.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Macronutrientes

Observaram-se diferenças significativas entre as variedades quanto à produção de matéria seca e eficiência de utilização, absorção e translocação de macronutrientes (Tabela 3).

A maior biomassa foi observada para a variedade Mundo Novo, conforme esperado, pois, geneticamente, esta variedade possui maior porte, folhas maiores e abundantes (Matiello et al., 2002) e, conseqüentemente, maior biomassa. O contrário foi observado na variedade Icatu, o qual apresentou as menores produções de matéria seca de raízes e também de parte aérea (Tabela 3).

A eficiência de utilização é definida como a capacidade de utilização de nutrientes para síntese de biomassa (Souza, 1994). A eficiência de utilização do nutriente absorvido pela planta é tão importante quanto a eficiência de absorção dos nutrientes, quando se avalia a produção de biomassa em relação ao suprimento de nutrientes.

De acordo com os contrastes entre médias para eficiência de uso (EU), observou-se que a variedade Icatu sobressaiu-se com maior EU de N ( $58,64 \text{ g}^2.\text{mg}^{-1}$ ), K ( $120,81 \text{ g}^2.\text{mg}^{-1}$ ) e Ca ( $161,48 \text{ g}^2.\text{mg}^{-1}$ ), não diferindo da Mundo Novo para os nutrientes N ( $54,12 \text{ g}^2.\text{mg}^{-1}$ ) e K ( $114,29 \text{ g}^2.\text{mg}^{-1}$ ). Estes resultados concordam com estudo realizado por Correia et al. (1983), em que a variedade Mundo Novo foi mais eficiente na utilização do N do que a Catuaí. Tomaz et al. (2003) também obtiveram maior EU do Ca para a variedade Mundo Novo ( $1,012 \text{ g}.\text{mg}^{-1}$ ) em relação à Catuaí ( $0,756 \text{ g}.\text{mg}^{-1}$ ) e não observaram diferenças quanto à eficiência de translocação e de absorção deste nutriente entre as variedades estudadas.

**TABELA 3** Produção de matéria seca da parte aérea, raízes e total e, eficiência de utilização (EU), absorção (EA) e translocação (ET) de macronutrientes por mudas de três variedades de cafeeiro produzidas em tubetes.

<b>Características</b>	<b>Catuai</b>	<b>Mundo Novo</b>	<b>Icatu</b>	<b>C.V.%</b>
Mat. seca da P.A. (g)	1,50b	1,83a	1,54b	15,00
Mat. seca das raízes (g)	0,58a	0,54a	0,47b	18,64
Mat. seca total (g)	2,08b	2,38a	2,01b	14,51
EU de N ( $g^2 \cdot mg^{-1}$ )	43,88b	54,12a	58,63a	17,52
EA de N ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )	0,173b	0,196a	0,153c	16,45
ET de N (%)	50,31b	50,96b	56,02a	8,52
EU de P ( $g^2 \cdot mg^{-1}$ )	369,4c	541,76a	500,95 b	14,59
EA de P ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )	0,020a	0,019a	0,017b	12,93
ET de P (%)	51,79b	61,45a	52,65b	3,70
EU de K ( $g^2 \cdot mg^{-1}$ )	81,87b	114,29a	120,81a	17,83
EA de K ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )	0,092 a	0,093a	0,073b	15,32
ET de K (%)	45,43c	61,59a	55,21b	8,30
EU de Ca ( $g^2 \cdot mg^{-1}$ )	113,79c	139,07b	161,48a	16,67
EA de Ca ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )	0,066b	0,075a	0,055c	13,75
ET de Ca (%)	49,60b	54,73a	47,98b	6,92
EU de Mg ( $g^2 \cdot mg^{-1}$ )	406,84a	320,54b	263,77c	14,78
EA de Mg ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )	0,018b	0,033a	0,033a	13,16
ET de Mg (%)	52,46a	34,99c	48,29b	6,01
EU de S ( $g^2 \cdot mg^{-1}$ )	783,13a	486,38b	291,37c	25,62
EA de S ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )	0,010c	0,022b	0,030a	19,52
ET de S (%)	50,87a	24,88b	50,44a	13,65

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si por Scott&Knott 5%  
 Todos os valores dos parâmetros foram significativos, a 1% de probabilidade, pelo teste F.

A maior eficiência de utilização do N pode ser atribuída à maior produção de biomassa pela parte aérea da variedade Mundo Novo. Vários estudos em outras culturas mostram o comportamento diferencial entre espécies ou variedades da mesma espécie na absorção e utilização de N (Fageria & Baligar, 1993; Wuest & Cassman, 1992). Furlani et al. (1986), avaliando o

comportamento diferencial de linhagens de arroz na absorção e utilização de nitrogênio em solução nutritiva, verificaram que a diferenciação entre as plantas deveu-se principalmente, à capacidade de uso do N, como variação nos pesos de matéria seca total.

A eficiência de utilização do P ( $541,76 \text{ g}^2.\text{mg}^{-1}$ ) foi maior na variedade Mundo Novo. A maior eficiência de uso do P pode ser um fator de grande importância em condições limitantes deste mineral, pois a planta poderia produzir mais com uma menor exigência deste nutriente. Para Gerloff & Galbeman (1983), a maior eficiência de utilização pode ser devido à menor necessidade de fósforo para reações bioquímicas da planta, à maior redistribuição do nutriente para os pontos de crescimento e à maior mobilização do fósforo armazenado nos vacúolos das células. Abichequer & Bohnen (1998), avaliando a eficiência nutricional de variedades de trigo quanto ao fósforo, demonstraram que as variedades eficientes e ineficientes no aproveitamento do P da solução nutritiva diferenciaram-se quanto à capacidade de translocar o P para a parte aérea e utilizá-lo na produção de matéria seca. Whiteaker et al. (1976), em estudo com linhagens de feijão na produção de matéria seca na eficiência de uso do fósforo, observaram que sob estresse de P, a taxa fotossintética foi maior nas plantas mais eficientes do que, nas ineficientes. Com isso mostrou-se que a eficiência em P pode estar associada ao metabolismo fotossintético.

A variedade Catuaí teve maior EU para o Mg e o S, provavelmente devido à melhor eficiência de translocação destes nutrientes. Entretanto, Tomaz et al. (2003), avaliando a eficiência nutricional de Ca e de Mg em mudas de *Coffea arabica* e *C. canephora*, não observaram diferença quanto à ET e as variedades Catuaí 15 e Conilon M.1 tiveram as menores EU do Mg. Quanto ao enxofre, Souza (1999) atribuiu a maior EU do S da cultivar Rubi ao maior sistema radicular, relacionada com a maior aquisição do nutriente no solo, tendo o mesmo tendo sido verificado neste experimento para a variedade Catuaí (0,58

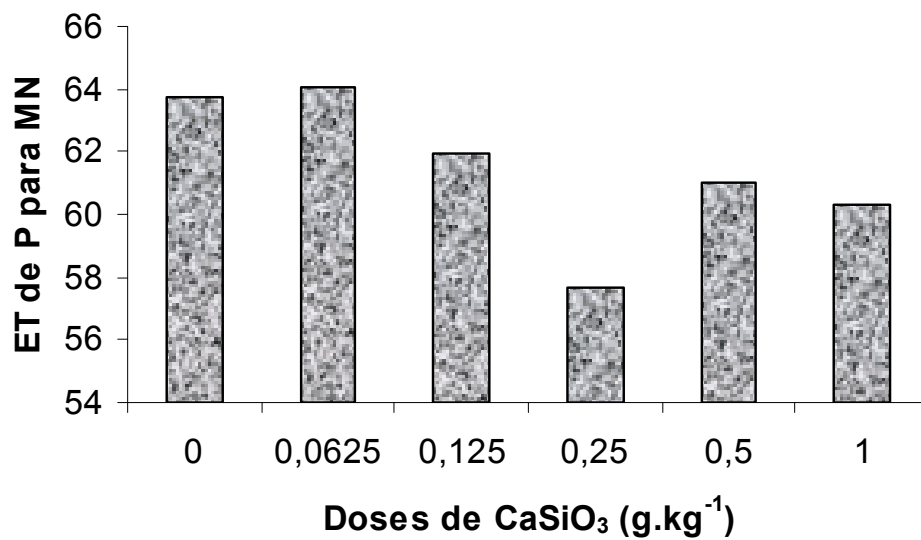
g de raízes secas). Essa variedade, segundo Matiello et al. (2002), possui bom sistema radicular, às vezes superior ao da Mundo Novo.

Variedades de muitas espécies de plantas apresentam diferenças na absorção de nutrientes. As diferenças entre as plantas quanto à capacidade de absorver nutrientes são decorrentes da variação na magnitude e morfologia do sistema radicular, como também da cinética de absorção de nutrientes. Variações nos parâmetros morfológicos de raiz (sistema radicular extensivo e eficiente) e nos cinéticos de absorção ( $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{mín}$ ) são necessárias para operar os modelos que descrevem quantitativamente o processo de absorção dos nutrientes (Anghinoni et al., 1989).

Para eficiência de absorção (EA), a variedade Mundo Novo sobressaiu-se com maior EA de N, P, K, Ca e Mg, não diferindo da Catuaí para os nutrientes P e K e nem da Icatu para o Mg. Já a variedade Icatu absorveu mais S do que as outras. A variedade mais vigorosa e, portanto, com perspectivas de maior produção, possui um sistema radicular mais extenso, explora maior volume de solo e intercepta maior quantidade de nutrientes, facilitando a absorção.

A variedade mais eficiente na translocação do N e do S foi a Icatu, não diferindo da Catuaí para o S. A Mundo Novo destacou-se na translocação de P, K e Ca, sendo a Catuaí mais eficiente na translocação de Mg e S. Um possível fator determinante nessa maior EA e de translocação do S pela variedade Icatu seria a sua capacidade desta de redistribuir as frações solúvel e insolúvel de S das folhas maduras para as folhas novas, dependendo do estado nutricional da planta (Sunarpi & Anderson, 1996).

Observou-se diferença significativa para eficiência de translocação (ET) de P na variedade Mundo Novo com as doses de silício (Figura 1), entretanto, nenhum dos modelos testados apresentou ajuste aos dados. Para essa variedade, observou-se redução na ET com o aumento das doses de silicato somente até

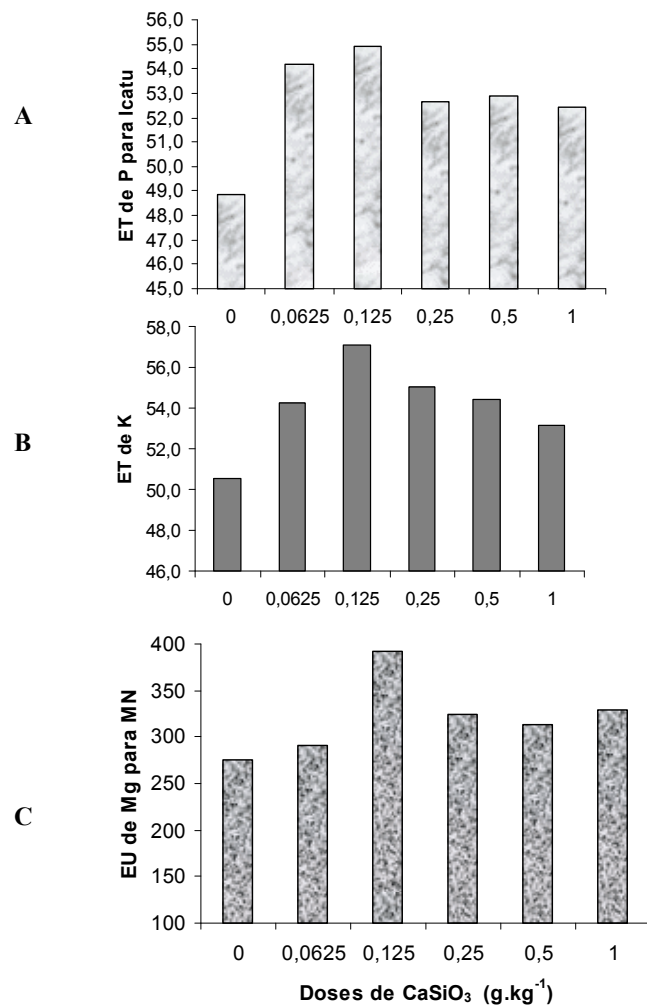


**FIGURA 1** Eficiência de translocação (ET) de P para a variedade Mundo Novo (MN) em função das doses de silicato de cálcio (CaSiO<sub>3</sub>) aplicadas ao substrato de plantio.

0,25 g.kg<sup>-1</sup>, após esse valor houve novo aumento. Em arroz, Méndez Baldeon (1995) testou o uso do termofosfato magnésiano, do superfosfato triplo e do superfosfato triplo mais calagem. O efeito favorável do termofosfato sobre o

aproveitamento do P foi devido, provavelmente, à sua capacidade de elevar o pH do meio e não devido à competição entre o Si do termofosfato e o P pelos mesmos sítios de adsorção no solo. Nesse experimento, a competição do fosfato com o silicato reduziu a eficiência de translocação do P para a variedade Mundo Novo.

Não se observaram diferenças significativas para a interação variedades e doses de silício, na produção de matéria seca das raízes, da parte aérea, total e eficiência de utilização de N, P, K, Ca e S. Também não houve interação significativa para a eficiência de absorção de N, P, K, Ca, Mg e S e translocação de N, K, Ca, Mg e S, embora tenha havido diferença ( $P = 0,05$ ) entre as doses de Si para ET de K, independentemente da variedade (Figura 2B). Para as variáveis ET de P da variedade Icatu (Figura 2A) e EU do Mg da Mundo Novo (Figura 2C), observaram-se diferenças significativas a 1% pelo teste de Scott & Knott, para ambas. Embora os modelos de regressão testados não tenham se ajustado aos dados para explicar estes fenômenos, pôde ser observada a diferença entre a testemunha sem silício e as outras doses. Ocorreu aumento da eficiência nutricional com o aumento das doses de Si em relação à dose zero de  $\text{CaSiO}_3$ . Houve aumento de 12,44% de ET de P para a variedade Icatu, 13,01% de ET de K, independentemente da variedade e 43,02% de aumento da EU de Mg pela variedade Mundo Novo para a dose  $0,125\text{g de CaSiO}_3.\text{dm}^3$  de substrato (Figuras 2A, B e C, respectivamente).



**FIGURA 2** (A) Eficiência de translocação (ET) de P para Icatu, (B) ET média de K no cafeeiro e (C) eficiência de utilização (EU) do Mg pela variedade Mundo Novo (MN), em função das doses de silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) aplicadas ao substrato de plantio.

## 5.2 Micronutrientes

Com relação aos micronutrientes, observaram-se diferenças significativas quanto à eficiência nutricional entre as variedades Catuaí, Mundo Novo e Icatu (Tabela 4). Todas as variedades diferiram entre si a 1% de probabilidade pelo teste F e as médias foram comparadas pelo teste de Scott & Knott a 5% de probabilidade.

**TABELA 4** Produção de matéria seca da parte aérea, raízes e total, e eficiência de utilização (EU), absorção (EA) e translocação (ET) de micronutrientes por mudas de três variedades de cafeeiro produzidas em tubetes.

Parâmetros	Catuaí	Mundo Novo	Icatu	C.V.%
EU de B ( $\text{mg}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ )	24,21c	37,08b	45,49a	18,66
EA de B ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0,311a	0,287b	0,198c	15,49
ET de B (%)	51,39b	62,10a	52,87b	7,09
EU de Cu ( $\text{mg}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ )	404,16a	197,34b	118,51c	22,73
EA de Cu ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0,0192c	0,0568b	0,075a	19,25
ET de Cu (%)	57,89a	19,34c	52,89b	16,67
EU de Zn ( $\text{mg}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ )	73,96a	20,31b	8,15c	30,07
EA de Zn ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0,105c	0,537b	1,10a	18,71
ET de Zn (%)	49,06a	11,40b	50,56a	13,99
EU de Fe ( $\text{mg}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ )	1,50a	1,21b	0,88c	18,91
EA de Fe ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	5,09c	8,86b	10,47a	19,52
ET de Fe (%)	47,84b	45,87b	60,19a	12,13
EU de Mn ( $\text{mg}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ )	9,96b	14,34a	15,29a	18,86
EA de Mn ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0,77a	0,75a	0,59b	19,60
ET de Mn (%)	52,08b	70,15a	54,79b	11,15
EU de Si ( $\text{g}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ )	460,74a	255,65b	224,87b	25,64
EA de Si ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0,017b	0,046a	0,042a	30,63
ET de Si (%)	54,33b	65,74a	44,96c	13,67



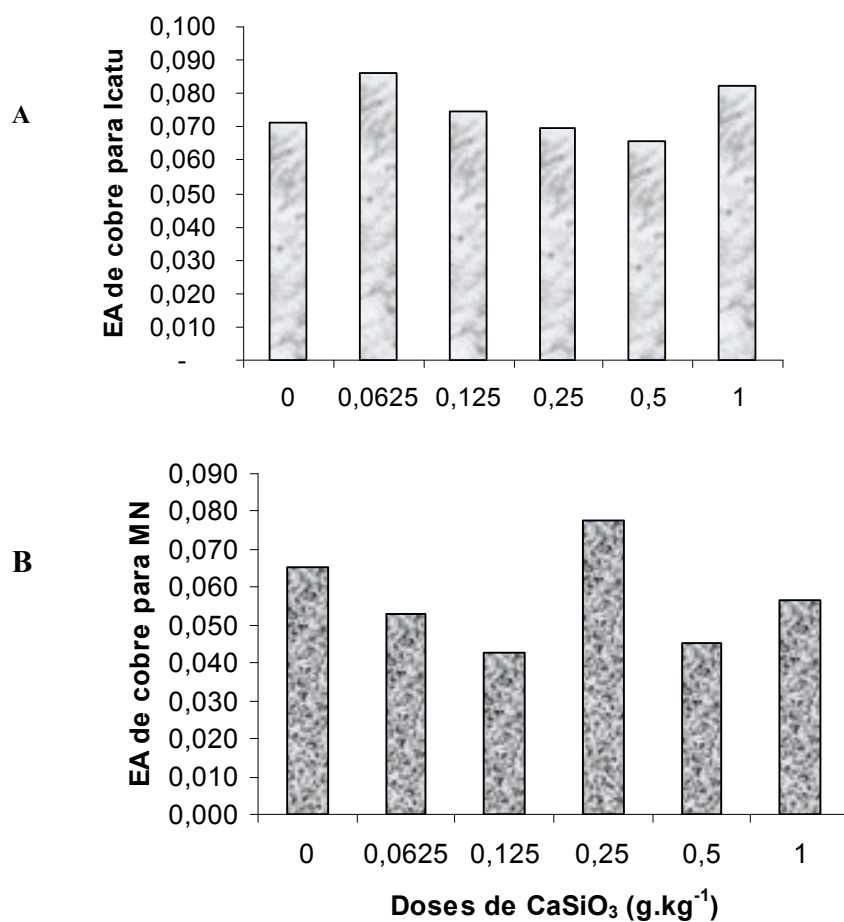
A variedade Catuaí teve maior eficiência de uso dos micronutrientes Cu, Zn e Fe, e também do Si. A Icatu, por sua vez, teve maior eficiência de uso do B e do Mn. Trabalho com adição de zinco e absorção, translocação e utilização de Zn e P por variedades de cafeeiro indicou o Conilon como mais eficiente na utilização de Zn comparado ao Catuaí, isto é, o Conilon produziu, em média, 0,146g de matéria seca por mg de Zn absorvido, enquanto o Catuaí produziu 0,108g de matéria seca por  $\mu$  g de Zn absorvido (Reis Jr. & Martinez, 2002). Neste experimento, a Catuaí ( $73,96 \text{ mg}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ ) foi superior às variedades Mundo Novo e Icatu (20,31 e os  $8,15 \text{ mg}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ , respectivamente), porém, teve menor EU, se comparado a EU de Zn obtida por Reis Jr. & Martinez (2002).

Quanto à EA, por outro lado, a variedade Icatu foi mais eficiente na absorção do Cu, do Zn, do Fe e do Si, enquanto a Catuaí absorveu mais B e Mn. Da mesma forma, Reis Jr. & Martinez (2002) encontraram maior eficiência de absorção de Zn para Catuaí ( $52,5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) do que para Conilon ( $29,8 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

Quanto à eficiência de translocação, a variedade Catuaí translocou mais Cu e Zn, a Mundo Novo o B, Mn e Si e a Icatu translocou mais Fe do que as outras e comportou-se de modo semelhante a Catuaí para o Zn (Tabela 3).

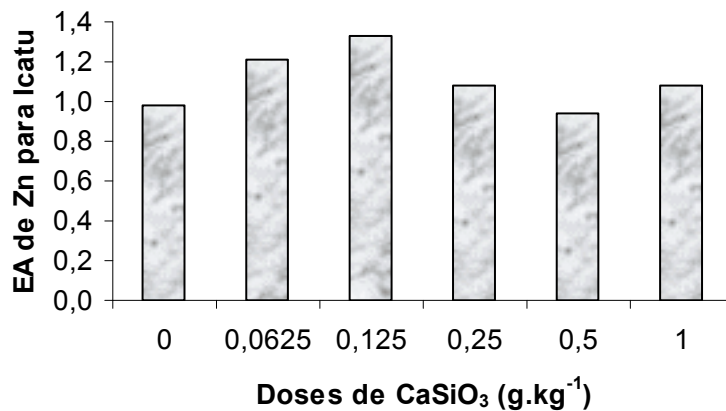
Não se observaram diferenças significativas das doses de silício sobre a eficiência nutricional das variedades para os parâmetros EU de B, Cu, Zn, Fe e Mn, EA de B e Mn, ET de B, Cu e Fe.

Observou-se diferença significativa para eficiência de absorção de cobre nas mudas da variedade Icatu com as doses de silício, tendo havido redução até a dose  $0,48 \text{ g}\cdot\text{dm}^3$  de  $\text{CaSiO}_3$  (Figura 3A). O aumento das doses de Si reduziu eficiência de absorção de cobre também para a variedade Mundo Novo (Figura 3B), exceto para a dose  $0,25 \text{ g}\cdot\text{dm}^3$  de  $\text{CaSiO}_3$ . Nessa dose, a EA de cobre foi 18,3% maior do que na testemunha e, para as outras doses, a EA foi menor.



**FIGURA 3** (A) Eficiência de absorção (EA) de cobre para as variedades Icatu e (B) Mundo Novo, em função das doses de silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) aplicadas no substrato de plantio.

Observou-se diferença significativa para a eficiência de absorção de Zn pelas mudas com as doses de silício. A dose zero de Si, ou seja, a testemunha, comportou-se semelhante às plantas adubadas com a dose  $0,5 \text{ g.kg}^{-1}$  e foi inferior às demais doses (Figura 4).

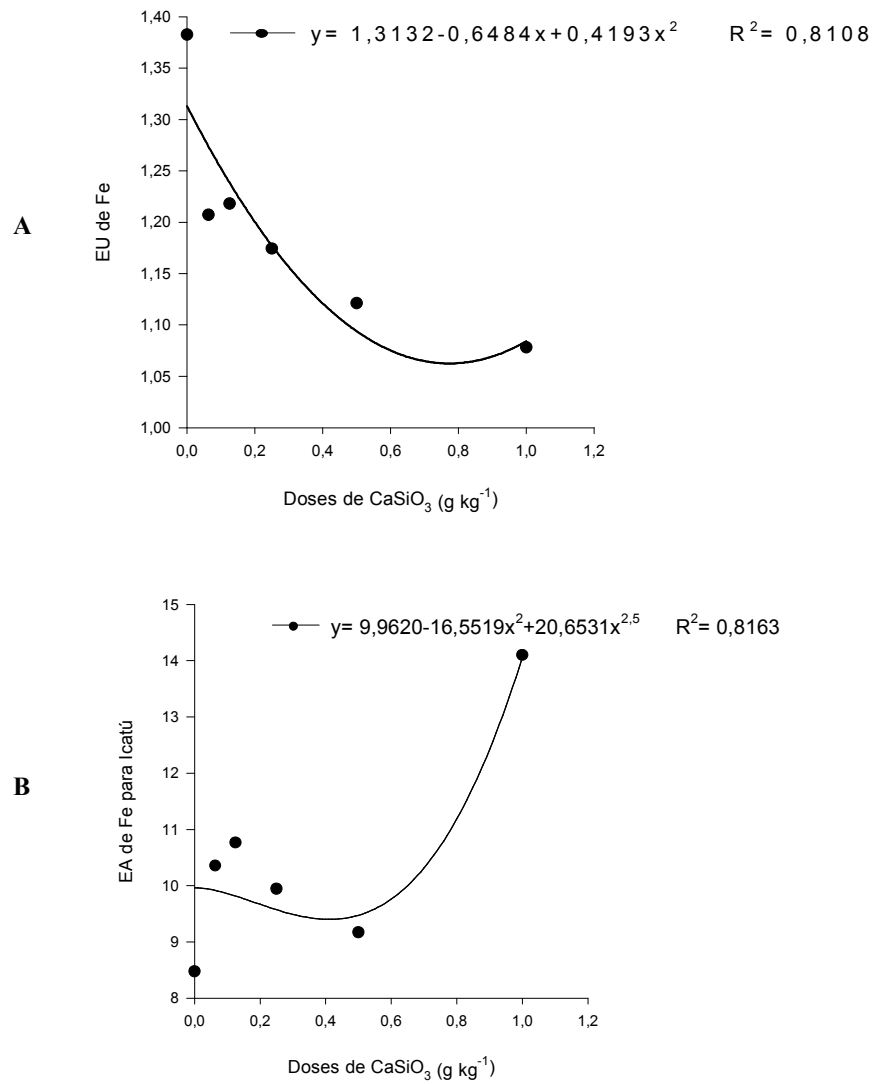


**FIGURA 4** Eficiência de absorção (EA) de zinco para a variedade Icatu, em função das doses de silicato de cálcio (CaSiO<sub>3</sub>) aplicadas ao substrato de plantio.

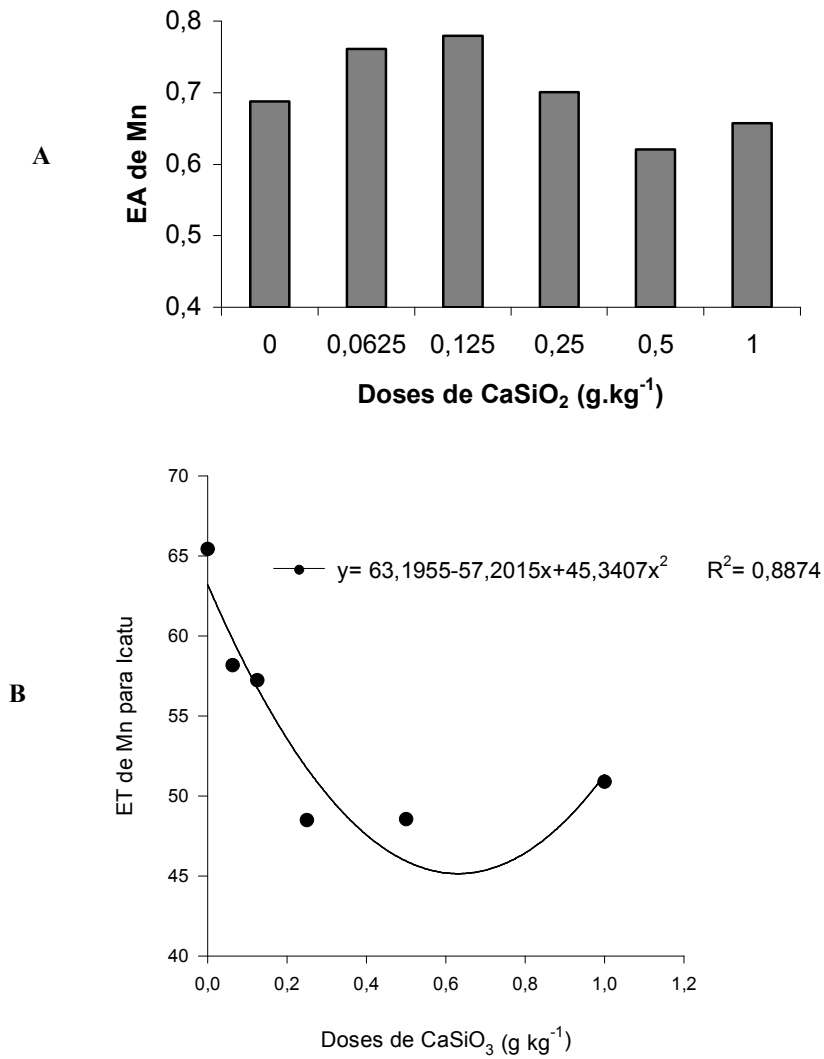
Observaram-se diferenças significativas na eficiência de utilização (EU) de Fe pelas mudas de cafeeiro e na eficiência de absorção (EA) de Fe (Figura 5) e de Mn com interação significativa para a EA de Fe e para a eficiência de translocação (ET) de Mn (Figura 6).

Com o aumento das doses de Si observou-se redução da EU do Fe pelas mudas de cafeeiro até a dose 0,77 g.dm<sup>3</sup> de CaSiO<sub>3</sub>, com tendência de aumento da EU a partir daí (Figura 5A). Na variedade Icatu, a EA de Fe

Independentemente da variedade, a EA de Mn foi 13% maior na dose 0,125 g.dm<sup>-3</sup> de CaSiO<sub>3</sub> do que na testemunha e 9,74% menor do que a mesma, na dose 0,5 g.dm<sup>-3</sup> (Figura 6A). A ET de Mn na variedade Icatu reduziu até a dose 0,631 g.dm<sup>3</sup> de CaSiO<sub>3</sub> (Figura 6B), aumentando em seguida.



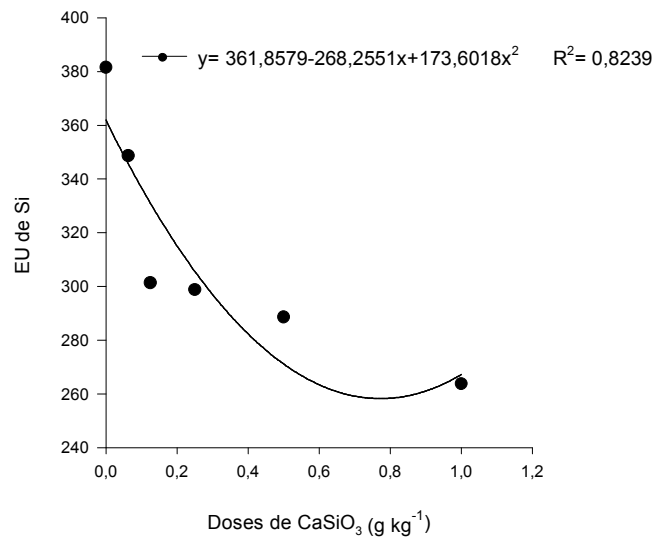
**FIGURA 5** Eficiência de utilização (EU) do íon ferro pelas mudas de cafeeiro (A) e eficiência de absorção (EA) do íon ferro pela variedade Icatu (B), em função das doses de silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) aplicadas ao substrato de plantio.



**FIGURA 6** – Eficiência de absorção (EA) de Mn pelas mudas de cafeeiro (A) e eficiência de translocação (ET) de Mn pela variedade Icatu (B), em função das doses de silicato de cálcio (CaSiO<sub>3</sub>) aplicadas no substrato de plantio.

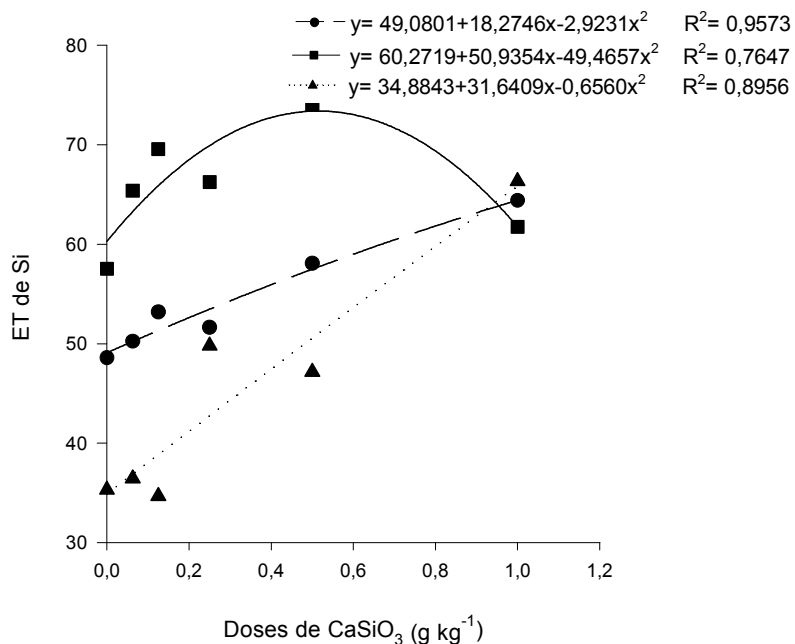
Uma forma pela qual o silício pode proporcionar um melhor equilíbrio nutricional em plantas de arroz diz respeito à sua capacidade de reduzir a absorção de Mn e Fe (Okuda e Takahashi, 1964; Verma e Minhas, 1987; Ma e Takahashi, 1990). Quando plantas de arroz são adubadas com silício, ocorre um aumento do poder de oxidação das raízes, ocorrendo uma oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  e do  $\text{Mn}^{2+}$  na superfície das raízes e, como resultado, uma deposição desses nutrientes e menor absorção pela planta. Como existe uma forte afinidade entre P e Fe e Mn, a relação entre esses elementos pode afetar a nutrição de P. O fósforo pode precipitar-se com o Fe na planta e combinar-se com o Mn numa forma inativa.

A EU do Si pelas mudas ajustou-se à equação de regressão de forma quadrática e reduziu-se com o aumento das doses de silicato de cálcio aplicados ao substrato de plantio. Essa redução ocorreu até a dose  $0,773 \text{ g.dm}^3$  de  $\text{CaSiO}_3$  (Figura 7). Não houve ajuste de um modelo de regressão para explicar o fenômeno biológico da EA do Si pelas mudas e a interação entre as variedades e as doses de  $\text{CaSiO}_3$  para a EA não diferiu significativamente. Em trabalho com absorção e translocação de silício em mudas de eucalipto cultivadas em Latossolo e Cambissolo, Carvalho et al. (2003) indicaram a existência de um mecanismo de exclusão de Si para esta cultura, pois a EA aumentou enquanto a EU diminuiu. Os autores também observaram relação inversa entre o incremento das doses de Si no solo e a eficiência de utilização do Si pela planta em Latossolo. Houve interação significativa entre ET e variedades. A resposta da ET às doses de Si ajustou-se ao modelo quadrático. Para as variedades Catuaí e Icatu observou-se aumento da ET com o aumento das doses, não se observando redução no intervalo estudado. Para a Mundo Novo, a ET aumentou até a dose  $0,515 \text{ g.dm}^3$  de  $\text{CaSiO}_3$  e reduziu sua eficiência a seguir. Houve aumento significativo na ET do Si com o aumento das doses deste elemento aplicadas ao substrato, entretanto, a magnitude da resposta diferiu de variedade para variedade (Figura 8).



**FIGURA 7** Eficiência de utilização (EU) de Si pelas mudas de café, em função das doses de silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) aplicadas ao substrato de plantio.

A adubação com silício pode aumentar a taxa fotossintética das plantas, pois o acúmulo de Si nas células da epiderme mantém as folhas mais eretas aumentando a penetração da luz no dossel. Diminui a transpiração excessiva, evitando ou reduzindo o estresse hídrico nas folhas e com isso, estimula a fotossíntese e a atividade radicular. Dessa forma pode aumentar a absorção de água e, conseqüentemente, de nutrientes (Lima Filho, 2004). A adubação silicatada, neste experimento, aumentou a absorção de P, de K e de Mg e reduziu absorção dos micronutrientes de maneira geral. Esse fato, entretanto, não prejudicou o crescimento e o desenvolvimento das mudas de café, pois não afetou a matéria seca total das plantas. Portanto, conclui-se que o Si promoveu o equilíbrio nutricional nas mudas de café.



**FIGURA 8** – Eficiência de translocação (ET) de Si nas mudas de café das variedades Catuaí, Mundo Novo e Icatu, em função das doses de silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) aplicadas ano substrato de plantio.

### 5.3 Relação do acúmulo do nutriente entre a parte aérea e as raízes

Existem vários mecanismos relacionados às características morfológicas e fisiológicas da planta, os quais contribuem para o uso eficiente de nutrientes, dentre eles a alta relação entre a parte aérea e as raízes. Dessa forma, pode-se ter correlação direta para este atributo, ou seja, quanto maior a relação parte aérea/raízes maior a eficiência nutricional da variedade (Fageria & Baligar, 1993).

Para a variedade Mundo Novo, a relação de acúmulo de N, P, K, Ca, B, Mn e Si entre parte aérea e raízes (PA/R) foi maior do que para as demais,



portanto, esta variedade teve maior capacidade de translocação destes nutrientes. A relação PA/R na variedade Catuaí foi maior para os nutrientes Mg, S e Cu, não diferindo da Icatu para o S. A variedade Icatu teve maior relação PA/R para Zn e Fe (Tabela 5). Em mudas de eucalipto, pela análise da relação de acúmulo de Si da PA/R, Carvalho et al. (2003) observaram retenção do Si nas raízes, pois a relação PA/R reduziu-se a partir de 60 dias após o transplântio, indicando redução da eficiência de translocação de Si pelo eucalipto com o avançar da idade das plantas. Nesse experimento, a relação PA/R corroborou com a afirmativa de que a variedade Mundo Novo tem a maior capacidade de translocação de nutrientes, comparada à Catuaí e a Icatu, visto que consegue translocar maior quantidade de nutrientes.

**TABELA 5** Relação de acúmulo de nutrientes na parte aérea/raízes (PA/R) de variedades de café cultivadas em tubetes

Relação parte aérea/raízes (PA/R)	Catuaí	Mundo Novo	Icatu	CV (%)
Relação PA/R de N	1,03b	1,26a	1,04b	15,11
Relação PA/R de P	1,077b	1,601a	1,129b	7,37
Relação PA/R de K	0,85c	1,63a	1,26b	17,84
Relação PA/R de Ca	0,99b	1,22a	0,93b	13,60
Relação PA/R de Mg	1,11a	0,54c	0,94b	11,79
Relação PA/R de S	1,06a	0,34b	1,05 <sup>a</sup>	17,67
Relação PA/R de B	1,06b	1,67a	1,12b	13,56
Relação PA/R de Cu	1,48a	0,25c	1,10b	26,23
Relação PA/R de Zn	0,94b	0,13c	1,06 <sup>a</sup>	20,50
Relação PA/R de Fe	0,91b	0,87b	1,57 <sup>a</sup>	23,97
Relação PA/R de Mn	1,09b	2,56a	1,30b	25,41
Relação PA/R de Si	1,25b	2,21a	0,91c	35,40

## 6 CONCLUSÕES

A variedade Icatu teve maior eficiência de absorção de Mg, S, Cu, Zn, Fe e Si, maior eficiência de utilização de N, K, Ca, B e Mn, não diferindo da Mundo Novo para os nutrientes N, K e Mn e maior eficiência de translocação de N, S, Zn e de Fe. A Catuaí, por sua vez, absorveu mais os nutrientes P, K, B e Mn, não diferindo da Mundo Novo para os nutrientes P, K e Mn; teve também maior eficiência de uso de Mg, S, Cu, Zn, Fe e Si, provavelmente devido à melhor eficiência de translocação destes nutrientes, exceto para o Fe e o Si. A Mundo Novo foi a variedade com maior peso da parte aérea e total. Além de ter sido a mais eficiente na absorção de N, P, K, Ca, Mg, Mn e Si, teve maior eficiência de utilização de N, P, K e Mn e maior translocação de P, K, Ca, B, Mn e Si, sendo considerada a mais eficiente nutricionalmente.

A adubação com silicato alterou a eficiência nutricional das variedades de cafeeiro, principalmente das variedades Icatu e Mundo Novo e praticamente não alterou a eficiência nutricional da Catuaí.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 21-26, jan./mar. 1998.

ANGHINONI, I.; VOLKART, C. R.; FATTORE, N.; ERNANI, P. R. Morfologia de raízes e cinética da absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 3, p. 355-361, set./dez. 1989.

DUNCAN, R. R.; BALIGAR, V. C. Genetics and physiological basis of nutrient uptake and use efficiency. In: BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R.; (Ed.). **Crops as enhancers of nutrient use**. New York: Academic Press, 1990. p. 3-35.

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; RESENDE, A. V. Absorção e translocação de silício em mudas de eucalipto cultivadas em Latossolo e Cambissolo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 3, p. 491-500, maio/jun. 2003.

CORREIA, J. B.; GARCIA, A. W. R.; COSTA, P. C. Extração de nutrientes pelos cafeeiros Mundo Novo e Catuaí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 10., 1983, Poços de Caldas. **Anais...** Rio de Janeiro: IBC/GERCA, 1983. p. 117-183.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 6-16, jan./abr. 1998.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Screening crop genotypes for mineral stresses. In: WORKSHOP ON ADAPTATION OF PLANTS TO SOIL STRESSES, 1993, Lincoln. **Proceedings...** Lincoln: University of Nebraska, 1993. p. 142-159.

FURLANI, A. M. C.; BATAGLIA, O. C.; AZZINI, L. E. Comportamento diferencial de linhagens de arroz na absorção e utilização de nitrogênio em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, n. 1, p. 51-59, jan./abr. 1986.

GALLO, J. R.; FURLANI, P. R. Determinação de silício em material vegetal pelo método colorimétrico do azul de molibdênio. **Bragantia**, Campinas, v. 37, n. 2, p. 5-11, jan. 1978.

GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (Ed.). **Inorganic plant nutrition**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. p. 453-480. (Encyclopedia of Plant Physiology, v. 15B)

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1958. 498 p.

KORNDÖRFER, G. H.; GASCHO, G. J. 1999. Avaliação de fontes de silício para o arroz. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARROZ IRRIGADO, 1., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas, 1999. p. 313-316.

LI, B.; MCKEAND, S. E.; ALLEN, H. L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, n. 2, p. 613-626, June 1991

LIMA FILHO, O. F. O silício: desenvolvimento da agricultura. Disponível em: <<http://www.plantearural.com.br/Artigos.asp?ID=75>>. Acesso em: 30 ago. 2004.

MA, J.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. **Plant and Soil**, The Hague, v. 126, n. 1, p. 115-119, Aug. 1990.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. revisada e atualizada. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARTINEZ, H. E. P.; FERNANDES, A. A.; OLIVEIRA, L. R. Produtividade, qualidade dos frutos e estado nutricional de plantas de pepino, cultivadas em hidroponia, em função das fontes de nutrientes. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 4, p. 571-575, dez. 2002.

MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F.; SACRAMENTO, L. V. S. et al. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferentes níveis de fósforo: II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 2, p. 239-244, maio/ago. 1993.

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNÁNDEZ, D. R. **Cultura do café no Brasil – novo manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2002. 386 p.

MÉNDÉZ BALDEON, J. R. **Efeito da ação alcalinizante e da competição entre silicato e fosfato na eficiência do termofosfato magnésiano em solos ácidos**. 1995. 88 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

OKUDA, A.; TAKAHASHI, E. The role of silicon. In: HOPKINS, J. **The mineral nutrition of the rice plant: proceedings of a Symposium at the International Rice Research Institute**. São Paulo: Kosmos, 1964. p. 123-146.

REIS JR, R. A.; MARTINEZ, H. E. P. Adição de Zn e absorção, translocação e utilização de Zn e P por variedades de cafeeiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 537-542, 2002.

SANDS, R.; MULLIGAN, D. R. Water and nutrient dynamics and tree growth. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 30, n. 1/4, p. 91-11, Feb. 1990.

SANTOS, D. M. dos. **Efeito do silício na intensidade da cercosporiose *Cercospora coffeicola* Berk. & Cooke) em mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal Plant Nutrition**, New York, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981.

SOUZA, M. E. **Correlação adulto juvenil para eficiência nutricional e comportamento de clones de *Eucalyptus grandis* em dois níveis de fertilidade do solo**. 1994. 102 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOUZA, R. B. **Níveis críticos de enxofre em solos e em folhas de cultivares de café**. 1999. 88 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SUNARPI & ANDERSON, J. W. Effect of sulfur nutrition on the redistribution of sulfur in vegetative soybean plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 112, n. 2, p. 623-631, Oct.

SWIADER, J. M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F. G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal Plant Nutrition**, New York, v. 17, n. 10, p. 1687-1699, 1994.

TOMAZ, M. A.; SILVA, S. R.; SAKIYAMA, N. S.; MARTINEZ, H. E. P. Eficiência de absorção, translocação e uso de cálcio, magnésio e enxofre por mudas enxertadas de *Coffea arabica*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 885-892, set./out. 2003.

VERMA, T. S.; MINHAS, R. S. Effect of iron and manganese interaction on paddy yield and iron and manganese nutrition in silicon-treated and untreated soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 147, n. 2, p. 107-115, Feb. 1987.

WHITEAKER, G.; GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. et al. Intraspecific differences in growth of beans at stress levels of phosphorus. **Journal of the**

**American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 101, n. 4, p. 472-475, July 1976.

WUEST, S. B.; CASSMAN, K. G. Fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated wheat. I uptake efficiency of preplant versus late-season application. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 4, p. 682-688, July/Aug. 1992.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por se tratar de estudo multidisciplinar, observou-se grande dificuldade em se associar as disciplinas como a fisiologia, a fitotecnia, a fertilidade dos solos, a nutrição das plantas e a fitopatologia em um único trabalho, pois cada uma destas procura realçar sua própria importância, dificultando a visão holística do contexto global. Entretanto, pôde-se constatar alguns gargalos com relação ao silício no controle da cercosporiose do cafeeiro.

As doenças são uma das principais causas de perdas na produção e na qualidade comercial dos produtos e podem, em alguns casos, ser controladas pelo silício, influenciando na infecção das doenças e na sua taxa de progresso. Nesse sentido, é importante fazer o manejo da cultura, reconhecendo-se que: nenhum nutriente por si só controlaria todas as doenças em todas as culturas; plantas em desequilíbrio nutricional são mais suscetíveis do que aquelas com uma nutrição adequada; a forma como os nutrientes estão disponíveis para as plantas, influencia o seu efeito sobre as doenças; alguns elementos minerais têm efeitos semelhantes no vigor das plantas mas efeitos opostos nas relações fisiológicas sobre as doenças.

O uso e o manejo do silício de forma equilibrada demonstrou ser uma alternativa válida e eficiente no controle de determinadas doenças de plantas. Há, contudo, a necessidade de se desenvolver mais pesquisas nas condições brasileiras, com as nossas culturas, sobretudo com a cultura do cafeeiro, procurando conhecer suas exigências nutricionais, bem como o comportamento das doenças em diferentes níveis, fontes e combinação de nutrientes. Faltam estudos conclusivos, por exemplo, com os micronutrientes, como Fe, Cu, Mn, B e Co, que participam da síntese de lignina, os quais podem atuar também como barreira química na indução de reações de defesa.

Para quase todas as relações patógeno–hospedeiro ocorre a interferência dos nutrientes como um todo. Entretanto, para todos os hospedeiros, são necessários mais estudos sobre a atuação de cada nutriente individualmente. Nos trabalhos encontrados sobre o assunto, faltam conexões entre o que foi aplicado no solo com os teores foliares dos nutrientes, portanto, os dados não refletem o que realmente foi absorvido pelas plantas.

Sugerem-se trabalhos interdisciplinares nos quais todos os ensaios e trabalhos de pesquisa em fertilidade do solo e nutrição do cafeeiro em que se estudam os nutrientes, suas doses, suas fontes, os modos de aplicação etc., sejam também avaliadas as doenças. Dessa forma, será possível obter um melhor entendimento dos efeitos do estado nutricional do cafeeiro sobre as doenças a que este é suscetível. O conhecimento e a obtenção de plantas bem nutridas com teores e equilíbrios adequados poderão levar a uma garantia de menor intensidade de doenças e uma redução no uso de defensivos agrícolas.