

A ADUBAÇÃO SILICATADA AMENIZA OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO NAS TROCAS GASOSAS DE CAFEIROS JOVENS¹

Rafael Vasconcelos Ribeiro^{2,5}; Rômulo Augusto Ramos³; Leandro da Silva^{3,4}; Sérgio Parreiras Pereira²; Fernando César Bachiega Zambrosi²; Cristiano Alberto de Andrade²

¹Trabalho financiado pelo Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café - CBP&D/Café

²Pesquisador, DSc., Instituto Agronômico, Campinas-SP, rafael@iac.sp.gov.br

³Pós-graduando, Instituto Agronômico, Campinas-SP

⁴Bolsista de mestrado - Fapesp

⁵Bolsista de produtividade em pesquisa - CNPq

RESUMO: O silício tem um papel importante nas respostas de espécies cultivadas a estresses ambientais, tal como o imposto pelo déficit hídrico. O objetivo desse trabalho foi testar a hipótese de que cafeeiros submetidos à adubação silicatada apresentariam menor restrição das trocas gasosas em condição de déficit hídrico, o que ocasionaria maior fotossíntese em condição ambiental limitante. Cafeeiros cv. Catuaí Vermelho com seis meses de idade foram submetidos a concentrações crescentes de silicato de cálcio no solo: 0; 750; 1500; 3000; e 6000 kg ha⁻¹. O experimento foi conduzido com plantas em vasos e sob condição de casa-de-vegetação. Após 180 dias, metade das plantas foi submetida à suspensão da irrigação, sendo realizadas avaliações de trocas gasosas foliares, potencial de água na folha e medidas morfológicas das plantas. O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema de parcelas sub-subdivididas, com três ou quatro repetições. As plantas submetidas à adubação silicatada apresentaram menor restrição da fotossíntese em condição de déficit hídrico, sendo esse fato ocasionado pela manutenção dos estômatos menos fechados e pela manutenção da eficiência instantânea de carboxilação. Sob déficit hídrico, a menor restrição estomática causou maior transpiração quando comparadas plantas controle com as crescidas sob disponibilidade de silicato de cálcio. A maior transpiração das plantas adubadas com silicato de cálcio causou menor potencial da água na folha no dia de máximo déficit hídrico (15º dia de suspensão da rega). Em geral, quanto maior a disponibilidade de Si no solo menor é o efeito do déficit hídrico na fotossíntese e na transpiração das plantas de cafeeiro.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, fotossíntese, silício

THE SILICATE FERTILIZATION ALLEVIATES THE WATER DEFICIT EFFECTS ON LEAF GAS EXCHANGE OF YOUNG COFFEE PLANTS

ABSTRACT: The silicon has an important role in crop response to environmental stresses, as that one imposed by water shortage. The aim of this work was to test the hypothesis that coffee plants subjected to silicate fertilization are less affected by water deficit, showing lower restriction of leaf gas exchange and leading to higher photosynthesis under this constraining condition. Coffee plants cv. Catuaí Vermelho around 6-months old were subjected to increasing concentration of calcium silicate in soil: 0; 750; 1500; 3000; and 6000 kg ha⁻¹. The experiment was carried out with potted-plants grown under greenhouse conditions. After 180 days, a group of plants was subjected to water withholding, being evaluations of leaf gas exchange, leaf water potential and morphological traits taken throughout the experimental period. The experimental design was in random blocks in a split-split plot scheme, with three or four replications. Coffee plants subjected to silicate fertilization showed lesser impairment of photosynthesis under water deficit, being this response related to the maintenance of stomatal aperture and to the maintenance of instantaneous carboxylation efficiency. Under water deficit, the lesser stomatal closure caused higher transpiration when comparing control plants and plants grown under calcium silicate availability. This higher transpiration induced reduction of leaf water potential at the day of maximum water deficit (15th day of water withholding). In general, as higher Si availability in soil is lower will be the effects of water deficit on photosynthesis and transpiration of coffee plants.

Key words: *Coffea arabica*, photosynthesis, silicon

INTRODUÇÃO

O silício (Si) é um elemento que confere resistência às plantas a múltiplos estresses (bióticos e abióticos) e não ocasiona danos quando acumulado nos tecidos (Epstein, 1999). Dentre os benefícios fisiológicos advindos da nutrição ocasionada pelo Si, há registros de aumento no teor de clorofila, aumento na atividade da enzima de carboxilação (Rubisco) e a diminuição da transpiração (Epstein, 1994). Alguns estudos sugerem uma arquitetura do dossel vegetal com folhas mais eretas, o que permite maior penetração de luz solar no interior da planta e consequente aumento na absorção de CO₂ (Takahashi, 1995). Trabalhando com mudas de cafeeiro em casa de vegetação, Santos Botelho (2002) observou influencia positiva da adubação silicatada, com aumento na área foliar total. Esse por sua vez, poderia ter ocorrido pela maior atividade da enzima Rubisco (Santos Botelho, 2002). Essa possibilidade está de acordo com Adatia & Besford (1986), que verificou aumento de 50% na atividade da Rubisco em folhas de plantas de pepino

suplementadas com Si. A maior carboxilação foi acompanhada pelo aumento no conteúdo de clorofilas a e b e aumentos da concentração de lignina e cálcio nos tecidos vegetais.

A perda de água através dos estômatos é inevitável para a absorção de CO₂ pelas plantas, sendo o controle estomático das trocas gasosas essencial em condição de baixa disponibilidade hídrica. A aplicação de Si tem causado aumento da tolerância ao déficit hídrico (Ma et al., 2004). Em arroz, a suplementação com Si reduziu a depressão do potencial hídrico ao meio-dia, impedindo a transpiração excessiva devido ao acúmulo de sílica na epiderme das folhas. Como consequência, houve maior produção de fitomassa seca (Matoh et al., 1991). No entanto, Agarie et al. (1998) verificaram que a redução da transpiração pelo Si foi atribuída a uma diminuição da transpiração pelo fechamento estomático e concluíram que o Si afetou a condutância estomática em arroz por prevenir fisicamente a perda de água em torno dos estômatos alterando as propriedades físicas das paredes das guarda células.

O objetivo desse trabalho foi testar a hipótese de que cafeeiros submetidos à adubação silicatada apresentariam menor restrição das trocas gasosas em condição de déficit hídrico, o que ocasionaria maior fotossíntese em condição ambiental limitante.

MATERIAL E MÉTODOS

O solo utilizado nesse estudo foi coletado na camada de 0 a 20 cm em área de cerrado, localizada no Centro Experimental do Instituto Agrônomo, Campinas/SP. Após a coleta, o solo foi peneirado e acondicionado em vasos plásticos para secagem. Os resultados da análise química do solo (Raij et al., 2001) são apresentados a seguir: pH (CaCl₂) 4,3; P 3,0 mg dm⁻³; S 14 mg dm⁻³; B 0,29 mg dm⁻³; Cu 2,3 mg dm⁻³; Fe 65 mg dm⁻³; Mn 3,3 mg dm⁻³; Zn 0,5 mg dm⁻³; Al 5,0 mmol_c dm⁻³; Ca 7,0 mmol_c dm⁻³; Mg 3,0 mmol_c dm⁻³; K 0,9 mmol_c dm⁻³; SB 10,9 mmol_c dm⁻³; CTC (pH 7,0) 49 mmol_c dm⁻³; V 22% e MO 28 g dm⁻³. Quarenta mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cv. Catuaí Vermelho com aproximadamente seis meses foram transplantadas para vasos plásticos (20 L) contendo o solo descrito e mantidas em condição de casa-de-vegetação.

A adubação do solo correspondeu à aplicação dos nutrientes nas seguintes doses, em mg kg⁻¹ de solo: 60 de N, 200 de P e 100 de K, fornecidos na forma de fosfato monoamônico (MAP) e cloreto de potássio (KCl). No mesmo momento, calcário dolomítico foi aplicado com dose calculada para elevar a saturação por bases a 50%, utilizando 1 g kg⁻¹ de solo. Este procedimento foi realizado para todos os vasos, independentemente do fornecimento do silicato de cálcio, tendo em vista que o principal objetivo do uso do fertilizante silicatado foi o fornecimento de Si e não a correção da acidez do solo. Antes da adubação silicatada, procedeu-se um teste para determinar o efeito do silicato de cálcio na variação da acidez do solo. Após incubação de 20 dias com umidade do solo a 80% da capacidade de campo, verificou-se que a variação máxima de pH (CaCl₂) foi de 0,55, o que não interferia de forma significativa sobre outros aspectos de fertilidade do solo e nutrição das plantas, uma vez que os nutrientes foram fornecidos em quantidades suficientes. Os micronutrientes foram fornecidos via solução nutritiva após 30 dias do início do experimento.

Além do tratamento controle (sem adição de Si no solo), as plantas foram crescidas em solo contendo silicato de cálcio correspondendo a concentrações de 750, 1500, 3000 e 6000 kg ha⁻¹. O solo foi mantido com umidade ao redor de 80% da capacidade de campo por um período de 180 dias. Após esse período, metade das plantas foi submetida à deficiência hídrica no solo pela suspensão da irrigação. A deficiência hídrica foi mantida até que as plantas sob déficit hídrico apresentassem sintomas de murcha visual no início do dia, sendo as variáveis fisiológicas avaliadas durante todo o período experimental entre a imposição do déficit hídrico e a recuperação das plantas após a re-irrigação. Avaliações de fotossíntese (*A*), condutância estomática (*g_s*), transpiração (*E*), eficiência instantânea de carboxilação (*A:Ci*) e eficiência do uso da água (*A:E*) foram realizadas com um analisador de gases por radiação infravermelha modelo LI-6400 (Licor, EUA). Essas variáveis foram analisadas em tecidos foliares completamente expandidos, expostos à radiação solar e maduros, em intervalos variando entre 1 e 3 dias, em temperatura do ar de 25°C, radiação fotossinteticamente ativa de 1000 μmol m⁻² s⁻¹, e concentração de CO₂ e umidade relativa do ar naturais, entre 9:00 e 10:30 h. A redução acumulada de *A* e *E* devido ao déficit hídrico foi calculada pela diferença entre as integrais das plantas mantidas irrigadas e as submetidas ao déficit hídrico ao longo do período experimental. No dia de máximo déficit hídrico (dia em que as plantas foram re-irrigadas no final da tarde), medidas de potencial da água na folha na antemanhã (*Ψ_m*) e as 14:00 h (*Ψ₁₄*) foram realizadas com uma câmara de pressão modelo 3005 (SoilMoisture, EUA), sendo a condutividade hidráulica da planta (*KL*) calculada (Ribeiro et al., 2009). Ao término da imposição do déficit hídrico, foi realizada a contagem do número de folhas, medido o diâmetro do caule, a altura das plantas e a área foliar (planímetro digital modelo LI-3000, Licor, EUA).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema de parcelas sub-subdivididas, com três ou quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 6% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A suspensão da rega causou decréscimo significativo na condutância estomática (*g_s*) dos cafeeiros controle e submetidos à adubação silicatada (Figura 1f-j). As diferenças de *g_s* entre os tratamentos foram menores à medida que a concentração de Si no solo aumentou (Figura 1f-j). A redução de *g_s* devido ao déficit hídrico foi atrasada pela adubação silicatada (Figura 1f-j), com as plantas crescidas sem a adição de Si ao solo apresentando redução de *g_s* no 6º dia após a

suspensão da rega (Figura 1f) e as plantas submetidas a 6000 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio mostrando decréscimo consistente de *gs* apenas a partir do 13º dia de déficit hídrico (Figura 1j). A redução de *gs* causou decréscimo da fotossíntese (*A*), sendo o efeito do déficit hídrico menos severo à medida que a concentração de Si aumentou (Figura 1a-e). Comparando-se as plantas controle com o tratamento de 6000 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio, nota-se uma atenuação dos efeitos negativos da seca em *A* ao redor de 60% na maior dose de Si (-21,9% vs. -8,7%). Esse efeito de atenuação da seca foi linear e inversamente proporcional ao aumento da concentração de Si no solo (Figura 2).

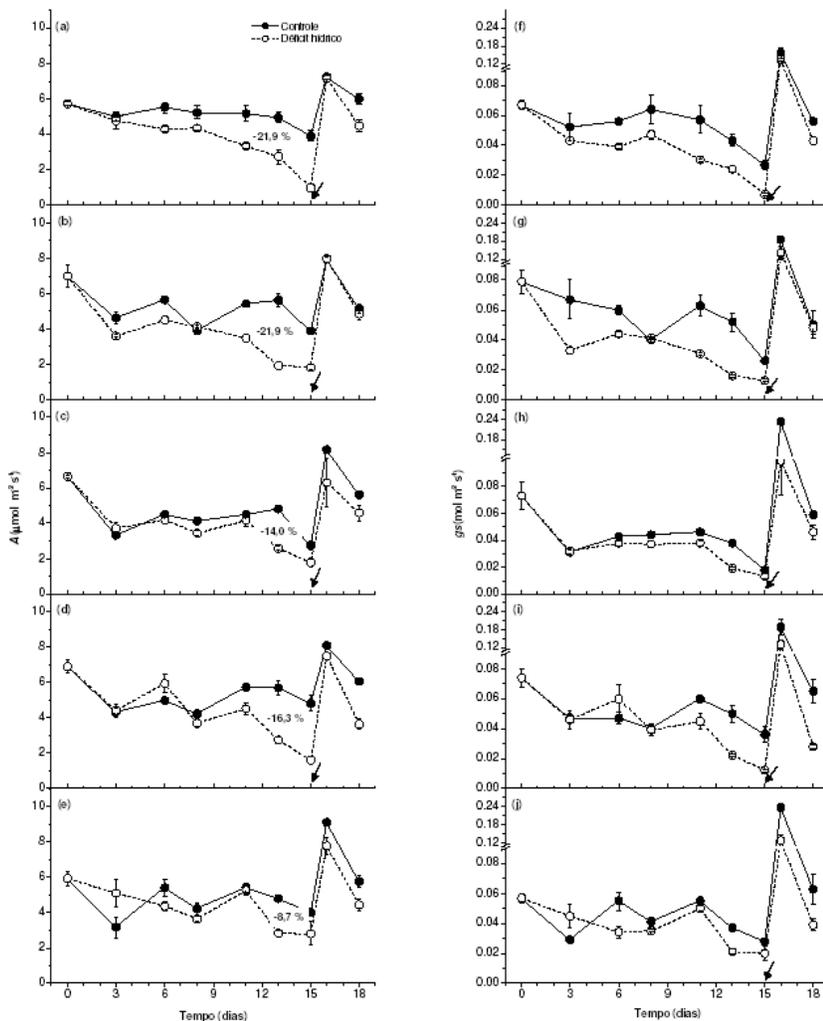


Figura 1 – Fotossíntese (*A*, em a-e) e condutância estomática (*gs*, em f-j) em cafeeiros jovens mantidos irrigados (controle) ou com suspensão da rega (déficit hídrico) e crescidos em solos com adubação silicatada (kg há⁻¹ de silicato de cálcio) variada: 0 (a,f); 750 (b,g); 1500 (c,h); 3000 (d,i) e 6000 (e,j). Os valores em (a) a (e) representam a redução acumulada de *A* ao longo do período experimental. Setas indicam o momento da reidratação (15º dia). Cada símbolo representa o valor médio de três repetições (\pm erro padrão).

Assim como em *A*, houve restrição da transpiração (*E*) nas plantas submetidas ao déficit hídrico. Essa resposta fisiológica sugere que a redução da abertura estomática foi eficiente em restringir a perda de água da planta para a atmosfera, evitando maior desidratação dos tecidos foliares. Novamente, as maiores diferenças entre plantas irrigadas e submetidas ao déficit hídrico ocorreram em cafeeiros controle, sendo a redução acumulada de *E* ao redor de 23%. As plantas submetidas a 6000 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio apresentaram redução acumulada de *E* ao redor de 11%, ou seja, o efeito da seca foi reduzido em mais de 50% quando comparados os tratamentos de 0 e 6000 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio.

A eficiência do uso da água, dada pela relação *A*:*E*, não foi afetada pela suspensão da rega e nem pela adição de silicato de cálcio no solo. As plantas crescidas em solo com Si apresentaram menores valores de Ψ_{14} ($p < 0,06$), variando entre -2,2 e -2,6 MPa (Figura 3b). Assim como em Ψ_m , as plantas hidratadas não apresentaram variações de Ψ_{14} , independente da disponibilidade de Si no solo. Os menores valores de Ψ_{14} nas plantas submetidas à adubação

silicatada podem ser consequência da maior transpiração relativa dessas plantas (ou menor restrição de E quando comparadas às plantas crescidas em solo sem Si).

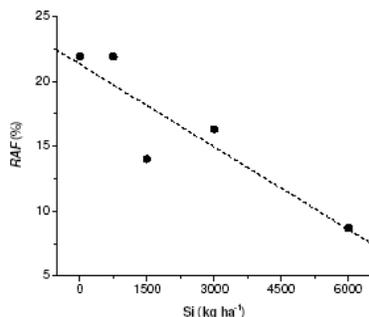


Figura 2 – Redução acumulada da fotossíntese (*RAF*) devido ao déficit hídrico imposto pela suspensão da rega em função da adubação silicatada em cafeeiros jovens. Cada símbolo representa o valor médio de três repetições (\pm erro padrão).

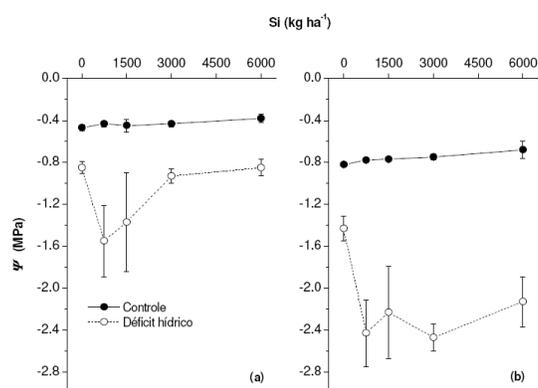


Figura 3 – Potencial da água na folha (Ψ) medido na antemanhã (a) e às 14:00 h (b) em cafeeiros jovens mantidos irrigados (controle) ou com suspensão da rega (déficit hídrico) e crescidos em solos com adubação silicatada (silicato de cálcio) variada por seis meses. Avaliações realizadas no momento de máximo déficit hídrico (15º dia). Cada símbolo representa o valor médio de três repetições (\pm erro padrão).

De fato, houve uma tendência de maior g_s nas plantas submetidas à maior concentração de Si no solo, com valor cerca de 3 vezes maior quando comparado ao controle sem Si (Figura 4b). Nesse momento (máximo déficit hídrico), as plantas hidratadas apresentaram maior g_s que as plantas sob seca, com exceção dos cafeeiros submetidos a 6000 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio. A manutenção da abertura estomática nas plantas submetidas à adubação silicatada em condição de déficit hídrico pode ser uma estratégia efetiva para manter a atividade fotossintética e o suprimento de fotoassimilados para a planta em períodos curtos de seca, como por exemplo, em veranicos. Em estiagens mais prolongadas, essa abertura estomática pode gerar desidratação excessiva da parte aérea das plantas e assim prejudicar o ganho de carbono pelos cafeeiros. A variação de E em função do déficit hídrico e da adubação silicatada foi similar a de g_s , com as plantas submetidas a 6000 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio apresentando E similar quando comparados os tratamentos com e sem reposição da água do solo (Figura 4c). Tanto em g_s como em E , houve uma tendência de aumento dos valores dessas variáveis com o aumento da concentração de Si no solo nas plantas submetidas ao déficit hídrico (Figura 4b,c). A condutividade hidráulica das plantas não foi afetada pela adubação silicatada, sendo significativamente reduzida pelo déficit hídrico (Figura 4a).

Considerando a resposta da fotossíntese (A) ao déficit hídrico, nota-se que A foi maior ($p < 0,06$) nas plantas estressadas à medida que a concentração de Si aumentou (Figura 4d). Em média, as plantas submetidas a 6000 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio apresentaram A cerca de 2,9 vezes maior quando comparadas às plantas sem adubação silicatada. A eficiência instantânea de carboxilação ($A:C_i$) também apresentou tendência de aumento com a adubação silicatada nas plantas sob déficit hídrico, sendo os maiores valores observados no tratamento com 6000 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio. Nesse tratamento, $A:C_i$ foi cerca de 3,4 vezes maior quando comparado ao tratamento sem adição de Si no solo, não havendo diferenças entre as plantas hidratadas e as submetidas ao déficit hídrico.

Considerando os aspectos morfológicos das plantas ao término da suspensão da rega, nota-se que o déficit hídrico ocasionou redução ($p < 0,06$) do número de folhas apenas nas plantas submetidas a 0 e 750 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio. No entanto, essa variação não ocasionou mudança significativa na área foliar das plantas, sugerindo que as

folhas das plantas crescidas sem a adição de Si no solo e em 750 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio apresentaram maior área individual das folhas no tratamento com déficit hídrico.

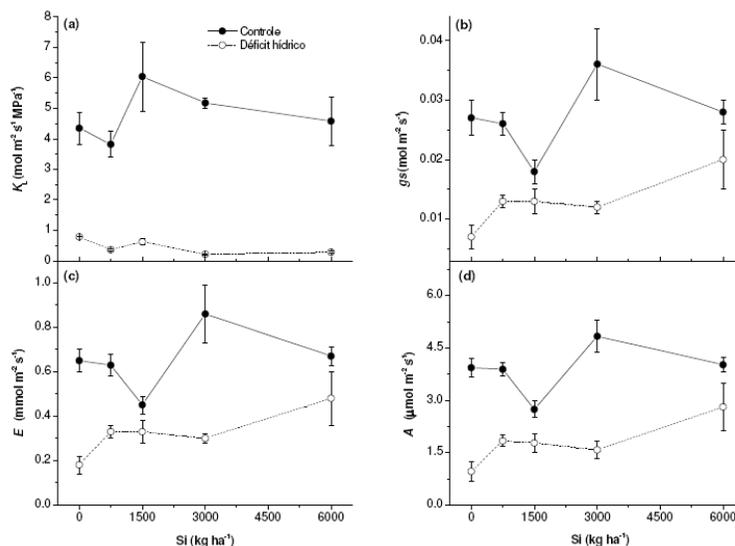


Figura 4 – Condutividade hidráulica da planta (KL , em a), condutância estomática (g_s , em b), transpiração (E , em c) e fotossíntese (A , em d) em cafeeiros jovens mantidos irrigados (controle) ou com suspensão da rega (déficit hídrico) e crescidos em solos com adubação silicatada (silicato de cálcio) variada por seis meses. Avaliações realizadas no momento de máximo déficit hídrico (15º dia). Cada símbolo representa o valor médio de três repetições (\pm erro padrão).

Um aspecto interessante notado nesse estudo foi o desempenho fisiológico das plantas no primeiro dia após o retorno da rega (16º dia). As plantas submetidas às maiores concentrações de Si no solo e mantidas irrigadas apresentaram aumento significativo de A e g_s (Figura 1) e $A:E$. Esse aumento também foi verificado nas plantas submetidas ao déficit hídrico, porém, foi menos intenso. Nessa ocasião, as plantas sem adição de Si no solo apresentaram A , g_s e $A:E$ semelhantes quando comparados os tratamentos controle e com suspensão de rega (Figura 1a,f). Quando comparadas as plantas sempre hidratadas dos tratamentos sem e com Si na concentração de 6000 kg ha⁻¹, nota-se que A , g_s e $A:E$ foram cerca de 1,3, 1,5 e 1,6 vezes maiores no tratamento com Si no 16º dia do período experimental, respectivamente. Esse dia apresentou características amenas em relação à diferença de pressão de vapor entre a folha e o ar, índice relacionado à umidade do ar.

CONCLUSÕES

As plantas submetidas à adubação silicatada apresentaram menor restrição da fotossíntese em condição de déficit hídrico, sendo esse fato ocasionado pela manutenção dos estômatos menos fechados e pela manutenção da eficiência instantânea de carboxilação. Sob déficit hídrico, a menor restrição estomática causou maior transpiração quando comparadas as plantas controle com as crescidas sob disponibilidade de silicato de cálcio. Em geral, quanto maior a disponibilidade de Si no solo menor é o efeito do déficit hídrico na fotossíntese e na transpiração das plantas de cafeeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADATIA, M.H.; BESFORD, A.T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. *Annals of Botany*, Oxford, v.58, n.3, p.343-351, 1986.
- AGARIE, S., UCHIDA, H., AGATA, W., KUBOTA, F., KAUFMAN, P.B. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, Tokyo, v.1, n.2, p.89-95, 1998.
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Washington, v.91, n.1, p.11-17, 1994.
- EPSTEIN, E. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Palo Alto, v.50, p.641-664, 1999.
- MA, J.F.; MITANI, N.; NAGAO, S.; KONISHI, S.; TAMAI, K.; IWASHITA, T.; YANO, M. Characterization of the silicon uptake system and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice. *Plant Physiology*, Rockville, v.136, n.9, p.3284-3289, 2004.

- MATOH, T.; MURATA, S.; TAKAHASHI, E. Effect of silicate application on photosynthesis of rice plants. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.63, n.3, p.248-251, 1991.
- RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. 284p.
- RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C.; SANTOS, M.G.; OLIVEIRA, R.F. Photosynthesis and water relations of well-watered orange plants as affected by winter and summer conditions. **Photosynthetica**, Pragma, v.47, 2009 (in press).
- SANTOS BOTELHO, D.M. **Efeito do silício na intensidade da cercosporiose (*Cercospora coffeicola* Berk. & Cooke) em mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG (Dissertação de Mestrado). 2002. 43p.
- TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T. ; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H., (Ed.). **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center. p.420-433, 1995.