

**CRESCIMENTO, ANATOMIA E RELAÇÕES HÍDRICAS DE
CAFEEIROS (*Coffea arabica* L.) ADUBADOS COM DIFERENTES
COMBINAÇÕES DE SILICATO DE CÁLCIO E CALCÁRIO**

THATIANE ABRAHÃO PEREIRA

2007

THATIANE ABRAHÃO PEREIRA

CRESCIMENTO, ANATOMIA E RELAÇÕES HÍDRICAS DE
CAFEIROS (*Coffea arabica* L.) ADUBADOS COM DIFERENTES
COMBINAÇÕES DE SILICATO DE CÁLCIO E CALCÁRIO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Agronomia, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador:

Prof. Dr. José Donizeti Alves

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2007

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

Pereira, Thatiane Abrahão

Crescimento, anatomia e relações hídricas de cafeeiros (*Coffea arabica* L.)
adubados com diferentes combinações de silicato de cálcio e calcário / Thatiane
Abrahão Pereira. -- Lavras : UFLA, 2007.

45 p. : il.

Orientador: José Donizeti Alves.
Dissertação (Mestrado) – UFLA.
Bibliografia.

1. Café. 2. Cilício. 3. Crescimento. 4. Relações hídricas. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.

CDD-633.73891

THATIANE ABRAHÃO PEREIRA

**CRESCIMENTO, ANATOMIA E RELAÇÕES HÍDRICAS DE
CAFFEEIROS (*Coffea arabica* L.) ADUBADOS COM DIFERENTES
COMBINAÇÕES DE SILICATO DE CÁLCIO E CALCÁRIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Agronomia, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para a obtenção do título de “Mestre”.


APROVADA em 16 de março de 2007

Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho

EPAMIG

Dr. Marcelo Murad Magalhães

UFLA


Prof. Dr. José Donizeti Alves
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus, que me permitiu mais esta conquista,

AGRADEÇO.

Meus pais, Rosângela Abrahão Pereira e Jaime A. Pereira (*in memoriam*),

Meu irmão, Bruno Abrahão Pereira,

DEDICO.

Meus avós, José Abrahão e Julieta Viana Abrahão (*in memoriam*),

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar e iluminar em todos os momentos de minha vida.

Ao Prof. Dr. José Donizeti Alves, pela orientação e disponibilidade.

A minha família, especialmente minha mãe, Francisco e meu irmão, pelo amor incondicional e apoio em todos os momentos.

Aos meus tios, Ednaldo, Edilson, Edmar e Enilson, pelo carinho, apoio e incentivo.

Aos meus primos, especialmente a Livia e Sheila, pela amizade.

A todos os colegas do Departamento, especialmente Larissa, Daniela, Rayris, Aline, Vanessa, Sidney, Morbeck, Anderson, Fernando, Gustavo e Tales.

Aos funcionários do Departamento, Tanha, Lena, Izonel e especialmente, Joel e Odorêncio, pela amizade.

Ao Prof. Evaristo Mauro de Castro, pela colaboração e amizade.

Ao Eng. Agrônomo Evaristo Gomes Guerra e ao Dr. Marcelo Murad Magalhães, que foram o braço direito deste trabalho, agradeço imensamente a dedicação e ajuda de vocês.

À EMATER-MG na pessoa do Gerente Regional Sérgio Glicério Martins, pela compreensão, amizade e, sobretudo, apoio nesta conquista pessoal e profissional.

Ao Pesquisador Gladyston, pela colaboração neste trabalho.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste sonho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	i
ABSTRACT	iii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Crescimento e desenvolvimento do cafeeiro	3
2.2 A deficiência hídrica no cafeeiro	4
2.3 Silicatos de cálcio e magnésio.....	7
2.4 O Silício no solo	9
2.5 O Silício na planta.....	10
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Experimento 1	15
3.2 Experimento 2	16
3.2.1 Características hídricas.....	17
3.2.2 Avaliações de crescimento.....	17
3.2.3 Características anatômicas.....	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1 Experimento 1	19
4.1.1 Avaliações de crescimento das mudas cultivadas em solo na capacidade de campo	19
4.2 Experimento 2	21
4.2.1 Avaliações fisiológicas de mudas de cafeeiro cultivadas em diferentes regimes hídricos	21
4.2.1.1 Crescimento	21
4.2.1.2 Avaliação das características hídricas	25

4.2.1.3 Avaliações anatômicas da folha	32
5 CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

RESUMO

PEREIRA, Thatiane Abrahão. Crescimento, anatomia e relações hídricas de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) adubados com diferentes combinações de silicato de cálcio e calcário. 2007. 45 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Objetivou-se avaliar o efeito da adubação silicatada, em substituição à calagem, no crescimento de cafeeiros, a partir de estudos hídricos e anatômicos, em três níveis de irrigação. O experimento foi conduzido em viveiro com sombrite e plástico na área experimental do Setor de Fisiologia Vegetal, DBI/UFLA, MG, no período de março/dezembro de 2006. Foram utilizadas mudas de cafeeiro com seis meses de idade, provenientes da EPAMIG/CTSM. Os tratamentos foram 5 diferentes combinações de calcário/silicato de cálcio, totalizando 270 vasos, com 3 repetições, dispostos em DIC. Aos 150 dias após o plantio, foram realizadas as avaliações de crescimento. Decorridos 8 meses após o plantio, as mudas, que eram irrigadas diariamente, foram submetidas a um esquema fatorial, sendo 5 combinações de calcário/silicato de cálcio e 3 regimes hídricos, da seguinte forma: na capacidade de campo, a cada 6 dias, os vasos submetidos eram pesados e a água perdida repostada, para a suspensão gradual da irrigação, a partir do 6º dia, e de 6 em 6 dias, a reposição foi gradativamente decrescendo, e na suspensão total da irrigação não houve reposição. Foram avaliadas características hídricas, características anatômicas e de crescimento. Nas avaliações de crescimento, as diferentes relações calcário/silicato de cálcio não interferiram no desenvolvimento das plantas, demonstrando viabilidade na substituição quando o mesmo for de fácil acesso. As plantas, na capacidade de campo, apresentaram valores constantes do potencial hídrico, resistência estomática e transpiração, demonstrando bom controle ambiental sobre a irrigação. Depois de 24 dias, plantas na suspensão gradual da irrigação foram observados valores do potencial hídrico menores naquelas que receberam silicato na mistura. Em relação à resistência estomática e a transpiração, não se detectou nenhuma diferença em função dos tratamentos. Na suspensão total da irrigação, as plantas apresentaram queda do potencial hídrico e baixo fechamento estomático. Umidade relativa, radiação e temperatura foliar não foram influenciadas pelas diferentes doses de calcário/silicato de cálcio. O silício, em quantidades elevadas, aumentou o

*Comitê Orientador: José Donizeti Alves-UFLA (Orientador), Gladyston Rodrigues Carvalho - EPAMIG (Co-orientador)

número de estômatos por área, a espessura da epiderme adaxial e a espessura do parênquima esponjoso, demonstrando maior adaptação às condições impostas.

ABSTRACT

PEREIRA, Thatiane Abrahão. Growth, anatomy and water relations of coffee (Coffea arabica L.) plants fertilized with different combinations of calcium silicate and limestone. 2007. 45 p. Dissertation (Master in Plant Physiology) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.*

This paper aimed to evaluate the effect of silicated fertilization in substitution to liming on coffee growth, based in water relations and anatomical studies, using three levels of irrigation. The experiment was conducted in nursery house located in experimental area of Plant Physiology, DBI/UFLA, MG, from march to December/2006. There were used coffee seedlings with six months of age, from EPAMIG/CTSM. The treatments had 5 different combinations of limestone/calcium silicate, totalizing 270 pots, 3 replicates, disposed in fully randomized design. After 150 days of planting there were made the growth evaluations. After 8 months of planting, the seedlings that were irrigated daily, were disposed in factorial design, using 5 combinations of limestone/calcium silicate and 3 water status levels, the field capacity every six days the pots were weighed and the water losbed was reposed, considering the gradual irrigation suspension, since the 6 th day and each 6 day the reposition was gradually decreasing and in the total irrigation suspension there is no reposition. There were evaluated water relations, anatomical characteristics and growth parameters. The different limestone/calcium silicate ratios did not interfere in plant development, showing a viability to substitute the liming, if the source of silicate was close to the crop. The plants rept infield conditions showed constant values of water potential, estomatic resistance and transpiration, showing anadequate environmental control on irrigation. After 24 days, plants with gradual water suspension showed lower values of water potential than that ones which received silicate in the mixture. In relation to stomatic resistance and transpiration, there were any difference among the treatments. Considering the total irrigation suspension the plants showed a drop in water potential values and low stomatic aperture. The relative humidity, radiation and leaf temperature were not influenced by different limestone/calcium silicate levels. The silicate in large amounts increased the number of stomata per are, the thickriess of adaxial

*Guidance Committee: José Donizeti Alves-UFLA (Adviser), Gladyston Rodrigues Carvalho-EPAMIG (Co- adviser)

epiderm and spongy parenchyma showing a higher adaptations to the conditions used.

1 INTRODUÇÃO

Como no passado, a cultura do café continua sendo responsável pela abertura e pela consolidação de novas regiões agrícolas, como o Cerrado, em Minas Gerais e áreas na Bahia e na Amazônia. Nessas áreas, pesam os seguintes fatores: solos sujeitos ao intemperismo e à lixiviação, portanto, mais pobres, caracterizados por baixa fertilidade (natural ou solos desgastados) com predominância de acidez elevada, altos teores de Al e excesso de Mn, baixo teor de matéria orgânica, baixos teores de Ca, Mg, K, P, baixa saturação de bases, baixa disponibilidade de micronutrientes, tendendo a apresentar baixas concentrações de Si trocável devido à dessilicificação, além de reduzida atividade microbiológica. Aliado a isso, o clima, principalmente a seca, está mais desfavorável, o mesmo ocorrendo com relação às pragas e doenças. Portanto, a produção brasileira, como também a mundial, poderia ser bem mais significativa, caso condições desfavoráveis ao cultivo, que reduzem a sua produtividade, não ocorressem.

Portanto, um dos grandes desafios da agricultura 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 emprego de cultivares nutricionalmente eficientes ou pelo uso de corretivos e fertilizantes.

Adubos contendo Si são atualmente usados em vários países do mundo e mesmo não sendo essencial, do ponto de vista fisiológico, para o crescimento e desenvolvimento das plantas a sua absorção pode trazer benefícios, tais como melhorar as propriedades químicas do solo; aumentar a tolerância a elementos tóxicos devido à sua complexação com íons Fe, Al e Mn presentes no solo; aumentar a espessura da epiderme da parede celular, enrijecendo a camada cuticular e aumentando a resistência contra doenças e pragas; regular a

transpiração e amenizar o estresse hídrico; aumentar a taxa fotossintética das plantas devido a alterações na arquitetura das plantas, proporcionando folhas mais eretas e, possivelmente, maior produção de matéria verde.

Como fonte de Si, uma das alternativas agrícolas de relevância econômica que vêm sendo estudadas é o uso de escórias da indústria siderúrgica, denominados como cálciosilício ou agro-silício, semelhante aos calcários. Seu uso na lavoura pode ser indicado como corretivo, em substituição ou complementação ao calcário. Porém, as informações disponíveis sobre o comportamento do Si em plantas existem com maior ênfase no crescimento e na produtividade de gramíneas, o mesmo valendo para legumes e cereais de maior importância econômica. Contudo, poucos esforços têm sido dedicados às espécies arbóreas.

O objetivo do presente trabalho foi verificar o efeito da adubação silicatada em substituição à calagem no crescimento de cafeeiros, a partir de estudos hídricos e anatômicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Crescimento e desenvolvimento do cafeeiro

O cafeeiro, pela sua origem, nos vales das regiões montanhosas da Abissínia, onde cresce permanentemente sob densas florestas tropicais ao abrigo de altas temperaturas e com precipitação bem distribuída, é originalmente considerado uma espécie adaptada à sombra, embora no Brasil, a maioria das lavouras seja conduzida a pleno sol. Essas condições em que a temperatura, durante a estação de maior crescimento, excede a 30°C e os níveis de radiação se aproximam de $2.200 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, causam estresse às plantas, especialmente àquelas jovens, onde após o plantio de mudas originadas de viveiros parcialmente sombreados, são submetidas, no campo, a maiores intensidades luminosas, acompanhadas por deficiência hídrica e extremos de temperatura (Nunes et al. 1993). Como resultado, as folhas apresentam-se amareladas devido à degradação de clorofilas, a temperatura foliar aumenta, enquanto a condutância estomática diminui. Conseqüentemente, as mudas não se desenvolvem e, muitas vezes, morrem, o que onera a fase de implantação da lavoura pela necessidade de replantio.

Porém, mesmo passado o período crítico do pós-plantio, os cafezais continuam expostos a condições ambientais variadas, as quais afetam os processos de crescimento, o desenvolvimento e a produção. Dentre os fatores que provocam danos às plantas, o déficit hídrico é, provavelmente, o que mais limita a produtividade, pois, além de afetar as relações hídricas das plantas, alterando-lhes o metabolismo, é um fenômeno de ocorrência em grandes extensões de áreas cultivadas (Martim, 2003).

Variações morfológicas e anatômicas em plantas de café têm sido pouco estudadas e informações básicas referentes a aspectos fisiológicos relacionados a tais variações, especialmente em condições de estresse hídrico, podem ser

bastante úteis na compreensão dos mecanismos envolvidos na tolerância diferencial existente no gênero *Coffea*, comumente observada em condições de campo. As variações na estrutura das folhas estão relacionadas, em grande parte, com o hábitat, representando uma importante resposta plástica das plantas às condições ambientais, especialmente a disponibilidade hídrica (Dias et al., 2005).

Como a periodicidade do crescimento vegetativo do cafeeiro está associada a diversos fatores além do déficit hídrico, como temperatura, fotoperíodo, irradiância e nutrição, o elemento silício vem sendo estudado como forma de induzir resistência ao estresse hídrico e aumentar o crescimento das mudas de cafeeiro no campo, com o conseqüente crescimento da parte aérea e raiz.

Com relação ao crescimento, Santinato et al. (1979) verificaram melhor aspecto vegetativo em mudas de cafeeiro com a calagem. Já Carneiro et al. (2006) verificaram que a aplicação de calcário com a adição de silício proporcionou um aumento de 17% da matéria seca total, em plantas de soja, quando comparada ao mesmo tratamento sem a adição de silício.

2.2 A deficiência hídrica no cafeeiro

A deficiência hídrica nas folhas ocorre quando a taxa de transpiração excede a taxa de absorção de água e esta deficiência pode ser um componente de variados estresses, como, por exemplo, a baixa disponibilidade hídrica do solo, solos salinos ou temperaturas muito baixas (Bray, 1997).

Quando o déficit hídrico apresenta evolução suficientemente lenta para permitir mudanças nos processos de desenvolvimento, o estresse hídrico tem vários efeitos sobre o crescimento, que incluem mudanças no ciclo e divisões celulares, mudanças no sistema de endomembranas e vacuolização, bem como alterações na arquitetura da parede celular, perda do gradiente do potencial de turgor e hídrico, desnaturação de proteínas e aumento na concentração de solutos.

As respostas das plantas ao déficit hídrico dependem da espécie e do genótipo, da duração e da severidade da perda de água, da idade e do estágio de desenvolvimento, do órgão e do tipo de célula e do compartimento celular. Além disso, uma perda gradativa de água pode permitir uma adaptação à condição de déficit, restringindo a extensão da injúria. A capacidade para sobreviver ao estresse é regida por mecanismos que conferem resistência ou tolerância. Existem, ainda, respostas ao estresse consideradas de ajuste (respostas reversíveis), escape ou adaptações (respostas evolutivas irreversíveis). Todos esses mecanismos podem ocorrer por meio da combinação de processos comportamentais, morfológicos, anatômicos, fisiológicos e bioquímicos e dependem, primordialmente, de processos moleculares (Nogueira et al., 2005).

Em resposta à condição de baixa disponibilidade hídrica, a maioria das plantas reduz, progressivamente, a taxa fotossintética. Durante as fases iniciais do estresse, o fechamento dos estômatos é o principal fator limitante da fotossíntese (Chaves, 1991) e, posteriormente, podem ocorrer quedas na taxa fotossintética devido a limitações fotoquímicas, aumento na resistência mesofílica e alterações na atividade da carboxilação, denominadas limitações não estomáticas (Chaves, 1991). Como o déficit hídrico afeta a produção e o consumo de fotoassimilados, inevitavelmente ele afetará o particionamento do carbono foliar e de toda a planta. Segundo Nunes et al. (1993), o fechamento dos estômatos, para evitar a perda de água pela transpiração, é considerado como o mecanismo mais importante da reação da planta à falta de água no solo.

Golberg et al. (1988) observaram que a fotossíntese permaneceu pouco afetada por potencial hídrico foliar na faixa de -1,5MPa e em valores de -2,0MPa. Kumar & Tiezen (1980) relataram, em condições de campo, reduções de apenas 25% na taxa fotossintética do cafeeiro. Por outro lado, em potenciais hídricos de -2,7MPa, a redução na taxa fotossintética não foi acompanhada por decréscimos na condutância estomática e, sim, por aumentos de 25% e 32% na concentração

interna de CO₂ em plantas de *Coffea arabica* L. cv. Catuai e *Coffea canephora* cv. Conilon, respectivamente (DaMatta, 1995).

Também as alterações anatômicas podem ocorrer em planta sob déficit hídrico, visando proteger e adaptar as espécies a este estresse. Uma suberização pronunciada da endoderme e da exoderme pode ser observada em plantas sob déficit hídrico, protegendo contra a dessecação e a morte de células corticais (Sharp & Davies, 1985). Segundo Baruch & Merida (1995), estas alterações são, provavelmente, devido a deposições de ligninas ou suberinas encontradas na exoderme, endoderme e camadas de células vizinhas ao córtex e à medula das raízes.

Também sob restrição hídrica, os estômatos adquirem um formato mais elipsóide, o que, segundo Rocha (2005), os torna mais funcionais, e a diferença no tamanho da abertura estomática apresenta maior efeito sobre a difusão de água do que sobre a difusão de CO₂ (Abram et al., 1994). Porém, para Kozlowski et al. (1991), a determinação da condutância estomática é mais importante do que seu número. Leite & Lleras (1978) destacam que, em condições xéricas, para aproveitar o tempo limitado de umidade relativa, as trocas gasosas poderão ser mais eficientes quanto maior for a área estomática útil.

O cafeeiro é uma espécie de relativa tolerância à seca, em função da estabilidade de vários parâmetros fisiológicos permanecerem relativamente constantes dentro de determinada faixa de deficiência hídrica. Entretanto, deve-se evitar a generalização, uma vez que existem diferenças no comportamento entre cultivares, nas duas espécies de importância comercial, *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora*, encontrando-se algumas bastante tolerantes e outras sensíveis (DaMatta, 1993).

A deficiência hídrica afeta, em relação à parte vegetativa, a área foliar, podendo ser observadas reduções de até 20% em *C. arabica* L. (DaMata, 1991). Os parâmetros relacionados ao crescimento vegetativo, como altura da planta,

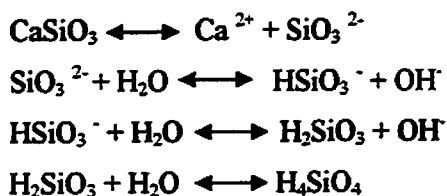
diâmetro do caule, número de ramos plagiotrópicos, massa seca de raízes e parte aérea, também são influenciados pela disponibilidade hídrica, apresentando maiores valores em condições de maiores lâminas de água. Por outro lado, Barros (1997), estudando a fenologia do cafeeiro na região de Viçosa, MG, atribuiu a queda e a paralisação do crescimento vegetativo, durante os meses de inverno, somente a baixas temperaturas, uma vez que o padrão de crescimento das plantas, nos lotes irrigados e não irrigados, não diferiu.

2.3 Silicatos de cálcio e magnésio

O Si está presente em minerais primários, como feldspato, augita, quartzo e mica, e em secundários, como caulinita, montmorilita, illita e clorita (Exley, 1998). A principal forma de Si no solo é o Si(OH)_4 (Tisdale et al., 1993). A solubilidade dos minerais silicatados no solo é variável e influenciada por temperatura, pH, tamanho de partículas, composição química e pela absorção do Si nas superfícies de minerais (Savant et al., 1997).

Os silicatos de cálcio e magnésio são constituídos, basicamente, de CaSiO_3 e MgSiO_3 . Os silicatos devem ser comercializados na forma de pó e, quanto mais finamente moidos, maiores sua reatividade e eficiência agronômica.

Segundo Alcarde (1992), o silicato de Ca é 6,78 vezes mais solúvel que o carbonato de Ca ($\text{CaCO}_3 = 0,014 \text{ g dm}^{-3}$, $\text{CaSiO}_3 = 0,095 \text{ g dm}^{-3}$). Também segundo este autor, a reação neutralizante do silicato pode ser explicada conforme as seguintes reações:



Desse modo, 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 qualquer fonte 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 (Shriver & Atkins, 2003).

O Brasil, o sexto maior produtor mundial de ferro gusa, possui uma produção anual de cerca de 25 milhões de toneladas, correspondendo à geração de cerca de 6,25 milhões de toneladas de escória por ano. O estado de Minas Gerais é o maior produtor nacional e responsável por mais da metade de todo ferro gusa e aço, produzidos internamente. A alta concentração de silicato de Ca e Mg nas escórias possibilita sua utilização como corretivo de acidez do solo e como fonte de Ca, Mg e Si para as plantas, especialmente para solos arenosos com baixíssima fertilidade natural e baixa CTC (Korndörfer et al., 2004).

Estudos em outros países demonstram a importância do Si nas culturas, o que vêm estimulando a aplicação do mesmo. Como exemplo, no Japão, 25% da área cultivada com arroz, recebe, anualmente, aplicações de silicato do cálcio, que pode variar de 0,5 a 1,0 t (Faria et al., 2000). Os produtos usados do Japão, Coreia, Taiwan e Sul da Flórida, nos EUA, como fonte de Si para o arroz são, basicamente, resíduos obtidos das usinas de aço, no Japão e da fabricação do fosfato tricálcico, nos EUA. Deve-se lembrar, no entanto, que alguns agregados siderúrgicos (fonte de Si) podem apresentar teores de metais pesados na sua composição. O uso, na agricultura, desse tipo de material deve ser evitado para não contaminar o solo. Entretanto, existem materiais derivados da indústria siderúrgica que apresentam baixos teores de metais, podendo, em alguns casos, apresentar níveis inferiores ao de calcários comercializados e possuir custo relativamente baixo (Korndörfer et al., 2004).

2.4 O Silício no solo

O Si encontra-se na solução do solo na forma de Si(OH)_4 , que é prontamente absorvido pela planta de forma passiva, via corrente transpiratória (Pozza, 2004). Ele pode originar-se da decomposição dos resíduos das culturas, dos fertilizantes silicatados, da água de irrigação, da dissorção dos polímeros de Si(OH)_4 , da dessorção dos óxidos de ferro e de alumínio ou da dissolução dos minerais do solo. Apesar dessa abundância esse elemento nunca parece na forma livre, estando sempre combinado com o oxigênio e outros elementos, principalmente na forma de sílica e silicatos. A maior parte dessas sílicas e silicatos do solo é insolúvel ou de solubilidade muito baixa e, portanto, em formas não disponíveis para as plantas. Os principais drenos do Si no solo são: a precipitação em solução, a formação de minerais, a polimerização do ácido monossilício, a lixiviação, a adsorção em óxidos e hidróxidos de Fe e Al e a adsorção pelas plantas (Lima Filho, 1999).

As análises de solo e ou planta são ferramentas imprescindíveis para uma boa recomendação de Si para as plantas. É preciso reconhecer, no entanto, que a calibração da análise de solo para Si é ainda insuficiente e precisa ser melhor estudada. Ainda não se constatou efeito tóxico do Si, não havendo, portanto, limites técnicos para a aplicação desse nutriente. Segundo Korndörfer et al. (2004), o limite acontece quando se leva em conta o efeito corretivo dos silicatos e a relação custo-benefício, isto é, doses excessivas de silicato podem provocar aumentos de pH acima dos valores desejados, podendo causar desequilíbrios nutricionais, principalmente deficiências de micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn e P), devido às reações de insolubilização.

Segundo este mesmo autor, a dose de silicato a ser aplicada nos solos deve ser baseada em qualquer dos métodos de recomendação de calagem (Alumínio, Saturação por bases, Ca + Mg, etc). A forma de aplicação (lanço e incorporado) e os critérios de reaplicação seguem a mesma orientação do

calcário, isto é, bem distribuído e, preferencialmente, incorporado na profundidade de 0–20 cm. Assim como o calcário, os silicatos também apresentam efeito residual longo (3-5 anos). No seu uso, deve-se observar que a distribuição deve ser cuidadosa, pois, com baixa umidade, já formam-se crostas.

2.5 O Silício na planta

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo superado apenas pelo oxigênio. 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, na sua ausência, a planta não completa seu ciclo de vida, não pode ser substituído por nenhum outro, tem efeito direto na vida da planta e 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 promovida por metais, menor evapotranspiração e efeitos na composição mineral, dentre outros. Por isso, o Si é classificado como elemento benéfico ou útil (Marschner, 1995). Como exemplos, o Si tem sido demonstrado como elemento útil para o arroz, capaz de aumentar o rendimento desta cultura por meio da diminuição da toxidez de Fe e Mn e do aumento da disponibilidade de P, devido a sua liberação dos fosfatos de Fe (Lian, 1976).

Queiroz et al. (2003), estudando a ocorrência de brusone, observaram que a aplicação de silicato resultou no controle da sua severidade, e no aumento de 47% na produção de arroz inundado. Portanto, 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, quando absorvidos, no interior do apoplasto, auxiliam o crescimento e o desenvolvimento das hifas dos patógenos (Takahashi, 1996).

A absorção de Si da solução do solo se dá de forma preferencialmente passiva, com o elemento acompanhando o fluxo de massa da água que penetra pelas raízes das plantas e, após a perda de água por transpiração, o Si fica retido nos tecidos das plantas (Korndorfer & Nolla, 2006). A capacidade de absorver Si é diferente entre plantas e, até mesmo, em plantas da mesma espécie. A concentração de Si também pode variar entre as diferentes partes da planta e ao longo das folhas, como foi observado em plantas de trigo, cevada e arroz, as quais apresentaram maior concentração de Si nas folhas mais altas (Jones & Handreck, 1967).

Contudo, o Si torna os tecidos foliares mais rígidos, conseqüentemente mais resistentes às pragas e à maior intensidade da doença, ao acamamento e à perda de água. Plantas de pepino suplementadas com 100 mg/L SiO_2 ao meio nutritivo apresentaram aumento na rigidez das folhas, mantendo-se mais horizontais, além de atraso na senescência, maior peso fresco e seco por unidade de área e o aumento no teor de clorofila (Adatia & Besford, 1986).

Barber & Shone (1966), estudando a absorção de Si em espécies cultivadas, observaram que mais de 94% do Si absorvido pelo trigo foi transportado rapidamente para a parte aérea, concentrando-se nas folhas mais velhas, as quais continham até 11,8% de Si. Em plantas de pepino, ao ser interrompido o suprimento de Si na solução, as folhas superiores apresentaram concentrações de Si marcadamente menores que as inferiores, indicando baixa translocação desse elemento na planta, igualmente ao que acontece com o Ca. De modo geral, nas monocotiledôneas (arroz, cana, trigo, cevada, centeio e milho), o destino da maior parte do Si transportado das raízes pela corrente transpiratória é acumulado

(precipitado) como SiO_2 em órgãos da parte aérea, tornando-se imóvel e, portanto, não sendo redistribuído (Jones et al., 1967).

O Si é um elemento químico envolvido em funções relacionadas com a transpiração, capaz de se concentrar na epiderme das folhas, formando uma barreira mecânica à invasão de fungos no interior das células, dificultando também o ataque de insetos sugadores e mastigadores (Epstein, 1999). O efeito da proteção mecânica do Si nas plantas é atribuído, principalmente, ao depósito na parede celular na forma de sílica amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). A acumulação de sílica nos órgãos de transpiração, por sua vez, provoca a formação de uma dupla camada de sílica cuticular, a qual, pela redução da transpiração, faz com que a exigência de água pelas plantas seja menor.

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.

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.

Pozza (2004), utilizando a microscopia eletrônica de varredura, observou a presença de uma cutícula mais espessa na superfície inferior da folha das plantas de café tratadas com Si, principalmente devido à camada de cera epicuticular mais desenvolvida. Essa camada de cera epicuticular, em “Catuai”, cobriu parcialmente os estômatos. Essa camada pode ter tornado a superfície hidrofóbica, impedindo a formação do filme de água, importante para os processos vitais da patogênese como a germinação e a penetração, além de permitir o acúmulo de substâncias antifúngicas na cutícula. A cutícula mais

espessa com a camada de cera epicuticular mais desenvolvida, observada por Pozza (2004), pode explicar, em grande parte, a redução do número de lesões de *Cercospora coffeicola* nas cultivares Mundo Novo e Catuai.

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 a levantarem a hipótese de este elemento estar envolvido na indução de reações de defesa da planta.

Deteção e análise de compostos antifúngicos em folhas de pepino infectadas levaram à determinação da natureza e à 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. (1994) observaram rápida ativação das enzimas peroxidase e polifenoloxidase após infecção por *Pythium* spp., em plantas cultivadas em solução nutritiva suplementada com Si.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em viveiro coberto com sombrite 50% e plástico translúcido na área experimental do Setor de Fisiologia Vegetal, Departamento de Biologia da Universidade Federal de Lavras. Foram utilizadas mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cv. Acaiá IAC 474/19, com seis meses de idade, produzidas em sacolas plásticas com dimensões de 11 x 22 cm, provenientes da EPAMIG/CTSM, Lavras, MG.

Como substrato para enchimento dos vasos, utilizou-se solo Latossolo Vermelho distrófico, com pH inicial no valor de 4,6; teores de cálcio de 0,7 cmolc.dm⁻³, de Mg de 0,2 cmolc.dm⁻³ e de silício de 7mg.dm⁻³. O cálculo da necessidade de calagem foi feito com base no método da neutralização do Al³⁺ e da elevação dos teores de Ca²⁺ + Mg²⁺, em função das *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais* (Ribeiro et al., 1999). A partir desse resultado, foi feita a conversão da correção do solo via calagem, calculada na camada de 0 a 20 cm, para o seu equivalente no volume de 8 litros do vaso.

Definida a quantidade de calcário, foi calculada a quantidade de silício e de calcário, fixando-se os teores de Ca e Mg para ambos (Tabela 1). Para isto, foi realizada uma análise do material, sendo que o calcário continha 30,56% de CaO e 22,18% de MgO e o silício (Agrossilício) 19,92% de CaO e 6,29% de Mg.

TABELA 1 - Tratamentos: combinações de adubações com carbonato de cálcio e silicato de cálcio.

Tratamentos	Calcário (% CaCO_3)	Silicato (% CaSiO_3)
1	100	0
2	75	25
3	50	50
4	25	75
5	0	100

Foi realizado o enchimento dos vasos de 8 litros com o substrato, e em todos os tratamentos, foram realizadas adubações de acordo com os resultados de análise de solo: 17g MAP/vaso para atender às necessidades iniciais de N e P, 5 g de KCl (2,81g de K), 0,09g de ZnSO_4 (0,018g de Zn), 0,03 g de CuSO_4 (0,006g de Cu) e 0,03g de ácido bórico (0,006g de B), os quais foram previamente misturados, com o auxílio de um homogeneizador manual. Após enchimento dos vasos, as mudas foram transplantadas seguindo-se o delineamento experimental em DIC, totalizando 270 vasos. Foram realizadas mais quatro adubações de cobertura com sulfato de amônio (2,5 g de N) e cloreto de potássio (2,5 de K), com intervalo de 30 dias, totalizando 10g por cada elemento. O período experimental foi de nove meses, totalizando 270 vasos com 3 repetições.

3.1 Experimento 1

No quinto mês após o plantio, foram realizadas avaliações de crescimento, e os parâmetros avaliados foram: área foliar determinada pela fórmula de Barros et al. (1973); altura das plantas (cm) e número de ramos plagiotrópicos.

3.2 Experimento 2

Decorrido oito meses após o plantio, as mudas, que eram irrigadas diariamente, mantendo-se o nível de água no solo próximo à capacidade de campo, foram divididas em 3 grupos, com os seguintes regimes hídricos: capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI). O experimento foi montado em um esquema fatorial sendo 5 combinações de calcário/silicato de cálcio x 3 regimes hídricos, com 3 repetições.

No início do estabelecimento dos regimes hídricos, os vasos foram pesados e mantidos na capacidade de campo. A cada 6 dias, os vasos, submetidos ao regime hídrico sob capacidade de campo eram pesados e a água perdida pela evapotranspiração repostada. Para o regime hídrico imposto gradualmente, a partir do 6º dia, e de seis em seis dias, a reposição foi gradativamente decrescendo (Tabela 2).

TABELA 2 - Percentagem de reposição da água perdida por evapotranspiração para os três regimes hídricos.

Data de reposição de água	Capacidade de campo(CC (%))	Reposição de água	
		Suspensão gradual da irrigação (SGI) (% da cc)	Suspensão total da irrigação(STI) (% da cc)
17/11	100	100	0
23/11	100	80	0
29/11	100	60	0
05/12	100	40	0
11/12	100	20	0
17/12	100	0	0

3.2.1 Características hídricas

As avaliações foram realizadas nos dias 23/11, 29/11, 05/12, 11/12 e 17/12. A avaliação do potencial hídrico de antemanhã (ψ_m máximo) foi realizado com o auxílio de uma câmara de pressão (Soil Moisture – Modelo 3005), entre 5h00 e 6h00, em folhas do quarto par totalmente expandidas, presentes no ramo ortotrópico em 3 mudas por tratamento.

A transpiração, a resistência estomática, a radiação, a temperatura foliar e a umidade relativa foram avaliados entre 9 e 10 h, nos mesmos dias, com o auxílio de um porômetro (Steady State Porometer, Licor. 1600M), utilizando-se a primeira folha do par totalmente expandido mais próximo do ápice do ramo ortotrópico, em três mudas por tratamento.

3.2.2 Avaliações de crescimento

As avaliações de crescimento foram estudadas no final do experimento, após as avaliações do dia 17/12. Foram avaliadas a massa seca de caule, folhas e raízes. A parte aérea foi obtida por meio da soma da massa seca de folha e caule.

3.2.3 Características anatômicas

A estrutura anatômica das folhas também foi estudada no final do experimento, após as avaliações do dia 17/12. O estudo foi realizado utilizando-se 6 folhas totalmente expandidas, retiradas do terço superior de 6 plantas de cada tratamento, seguindo a mesma orientação cardinal. Após a coleta, as folhas foram fixadas em álcool etílico 70% e armazenadas em vidros para posteriores análises. Os cortes transversais foram realizados na região mediana da folha, por meio de secções obtidas com o auxílio do micrótomo manual. Em seguida, as secções foram clarificadas em solução a 50% de hipoclorito de sódio, foram lavadas em água destilada e submetidas ao processo de coloração com a mistura

de azul de astrasfranina, seguindo-se os métodos descritos por Kraus & Arduin (1997), tendo as lâminas sido montadas em glicerina a 50%.

As determinações de espessura foram feitas a partir de seis medições das espessuras das epidermes adaxial e abaxial, dos parênquimas paliçádico e esponjosos, portanto, a amostra foi constituída de 18 medições para cada tratamento. A espessura do limbo foliar foi obtida a partir da soma das epidermes com os parênquimas.

Para as avaliações relativas à caracterização dos estômatos (número médio por mm^2 , diâmetro polar e equatorial), foram feitos cortes paradérmicos manuais, utilizando-se uma lâmina de barbear. Os cortes foram realizados na região mediana das folhas na epiderme da face abaxial, colocados sobre uma lâmina contendo azul de toluidina e água glicerinada. A contagem do número de células epidérmicas, estômatos e medições do diâmetro polar e equatorial foi realizada com o auxílio de câmara clara, em microscópio Olympus CCB, segundo técnica de Labouriau et al. (1961). Foram observados sete campos da região mediana por repetição, totalizando 21 campos por tratamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento 1

4.1.1 Avaliações de crescimento das mudas cultivadas em solo na capacidade de campo

Sob condição de adequado suprimento de água, as diferentes relações de calcário/silicato de cálcio não influenciaram a altura das plantas, o número de ramos e a área foliar avaliados 150 dias após o plantio (Figura 1):

Os resultados mostram que a aplicação de silicato, em solo com bom suprimento de água, pode substituir a calagem, sem prejuízos ao crescimento da planta. A calagem proporciona efeitos benéficos sobre o crescimento e a produção do cafeeiro, como observado por Santinato et al. (1979) que verificaram melhor aspecto vegetativo das plantas, demonstrando melhores perspectivas de produção. Porém, Carneiro et al. (2006) verificaram que a aplicação de calcário com a adição de silício proporcionou um aumento de 17% da matéria seca total em plantas de soja, quando comparado ao mesmo tratamento sem a adição de silício. Portanto, a substituição pode ser vantajosa, principalmente em regiões nas quais os silicatos de cálcio ou escórias de siderurgia são facilmente obtidos.

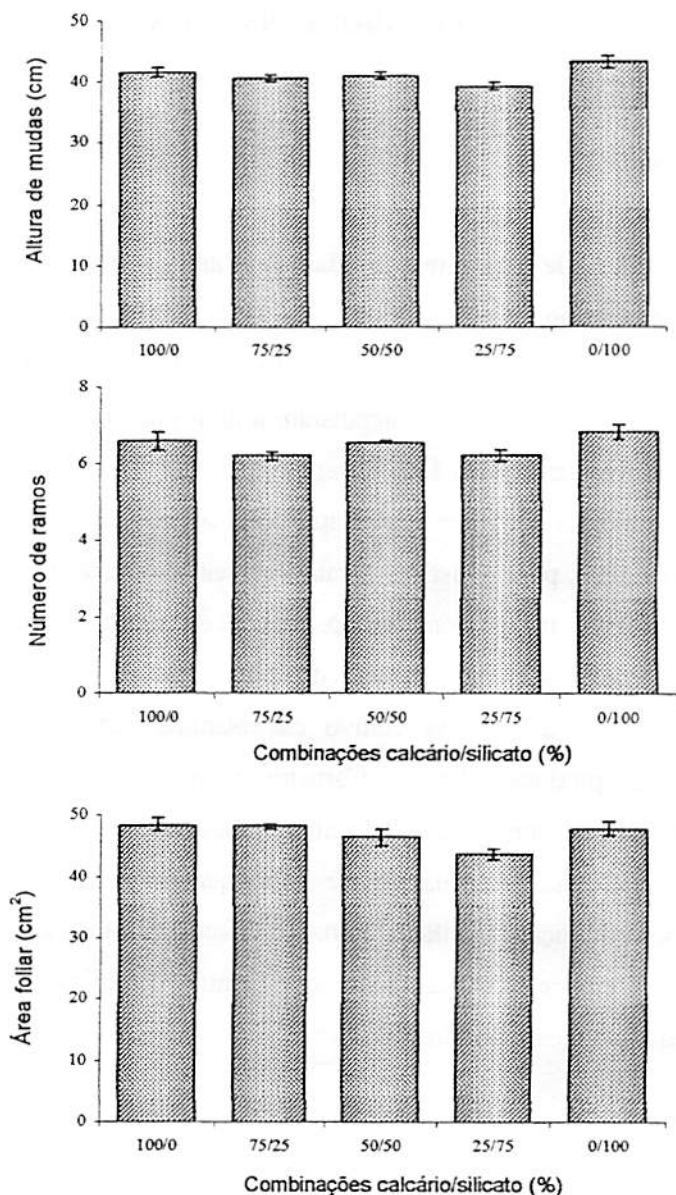


FIGURA 1- Altura de mudas, número de ramos plagiotrópicos e área foliar de mudas de cafeeiro da cv. Acaia, após 150 dias da adubação com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições . UFLA, Lavras, MG, 2007.

4.2 Experimento 2

4.2.1 Avaliações fisiológicas de mudas de cafeeiro cultivadas em diferentes regimes hídricos

4.2.1.1 Crescimento

Para o regime hídrico de solo na capacidade de campo, observa-se que as relações 100/0, 75/25 e 0/100 de calcário/silicato de cálcio, proporcionaram maior massa seca de folhas, raízes e caule (Figura 2). Esses resultados a exemplo do que aconteceu com a altura das plantas, número de ramos plagiotrópicos e área foliar (Figura 1), permitem concluir que, ao menos na fase inicial de desenvolvimento do cafeeiro, o calcário pode ser substituído com a mesma eficiência pelo silicato de cálcio, quando se tem um adequado suprimento de água.

Sob condições de lenta imposição de déficit hídrico, aqui denominado suspensão gradual da irrigação, as maiores massas secas de folha, raiz e caule ocorreram quando se aplicaram calcário e silicato de cálcio nas relações 75/25 e 0/100 (Figura 2).

Em cafeeiros cultivados com a suspensão total da irrigação, característico de um déficit hídrico severo, apesar de não terem sido observadas diferenças significativas entre as cinco relações estudadas quanto à massa seca de folha (Figura 2a), a relação 0/100 levou a um maior crescimento de raízes e de caule (Figura 2b,c). A aplicação isolada de silicato de cálcio ou a mistura com o calcário na relação 75/25 foram as que proporcionaram um maior crescimento de parte aérea total (Figura 3), embora sem alterar a relação parte aérea/raiz (Figura 4). Portanto, as relações 75/25 e 0/100 que obtiveram maior crescimento da parte aérea, também proporcionaram um crescimento da raiz,

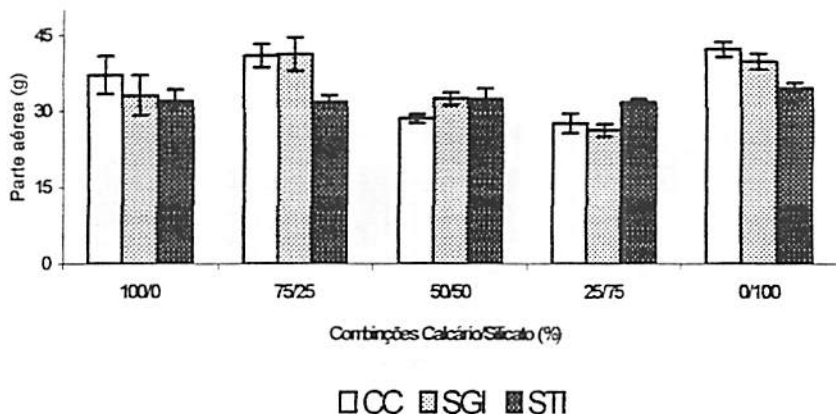


FIGURA 3 - Produção de massa seca da parte aérea de mudas de cafeeiro da cv. Acaiá, após 30 dias de cultivo nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

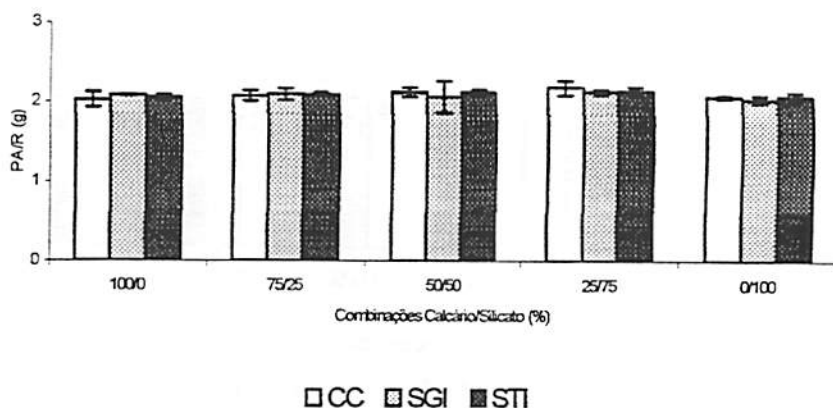


FIGURA 4 - Relação de acúmulo de massa seca na parte aérea/raízes de mudas de cafeeiro da cv. Acaiá, após 30 dias de cultivo nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

4.2 Experimento 2

4.2.1 Avaliações fisiológicas de mudas de cafeeiro cultivadas em diferentes regimes hídricos

4.2.1.1 Crescimento

Para o regime hídrico de solo na capacidade de campo, observa-se que as relações 100/0, 75/25 e 0/100 de calcário/silicato de cálcio, proporcionaram maior massa seca de folhas, raízes e caule (Figura 2). Esses resultados a exemplo do que aconteceu com a altura das plantas, número de ramos plagiotrópicos e área foliar (Figura 1), permitem concluir que, ao menos na fase inicial de desenvolvimento do cafeeiro, o calcário pode ser substituído com a mesma eficiência pelo silicato de cálcio, quando se tem um adequado suprimento de água.

Sob condições de lenta imposição de déficit hídrico, aqui denominado suspensão gradual da irrigação, as maiores massas secas de folha, raiz e caule ocorreram quando se aplicaram calcário e silicato de cálcio nas relações 75/25 e 0/100 (Figura 2).

Em cafeeiros cultivados com a suspensão total da irrigação, característico de um déficit hídrico severo, apesar de não terem sido observadas diferenças significativas entre as cinco relações estudadas quanto à massa seca de folha (Figura 2a), a relação 0/100 levou a um maior crescimento de raízes e de caule (Figura 2b,c). A aplicação isolada de silicato de cálcio ou a mistura com o calcário na relação 75/25 foram as que proporcionaram um maior crescimento de parte aérea total (Figura 3), embora sem alterar a relação parte aérea/raiz (Figura 4). Portanto, as relações 75/25 e 0/100 que obtiveram maior crescimento da parte aérea, também proporcionaram um crescimento da raiz,

fato importante para o equilíbrio entre a água perdida pela evapotranspiração e sua reposição pela absorção.

Os resultados obtidos para o crescimento vegetativo de mudas de cafeeiros até os 8 meses de idade sugerem que a aplicação isolada de silicato de cálcio ou sua substituição de 25% do calcário são benéficas para qualquer regime hídrico, principalmente seca.

Esta maior produção de matéria seca nos tratamentos com 100% de silicato de cálcio pode estar relacionada com o silício que, provavelmente, esteja aumentando 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 (Pozza, 2004).

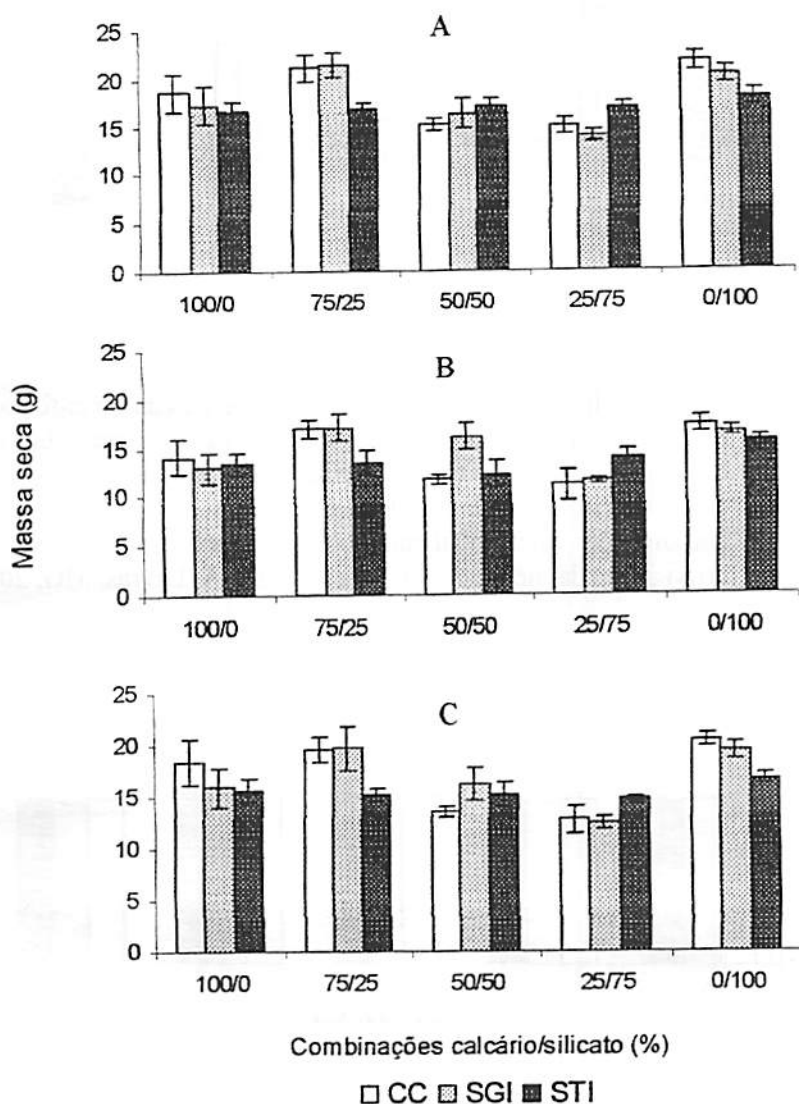


FIGURA 2 - Produção de massa seca de folhas (A), raízes (B) e caule (C) de mudas de cafeeiro da cv. Acaiá, após 30 dias de cultivo nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

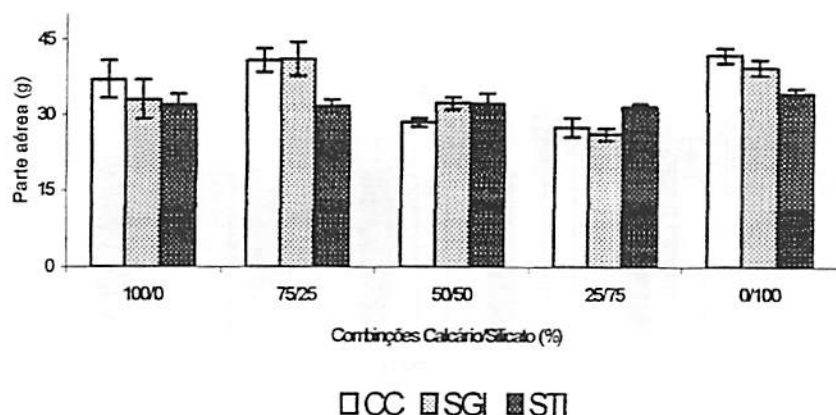


FIGURA 3 - Produção de massa seca da parte aérea de mudas de café da cv. Acaia, após 30 dias de cultivo nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

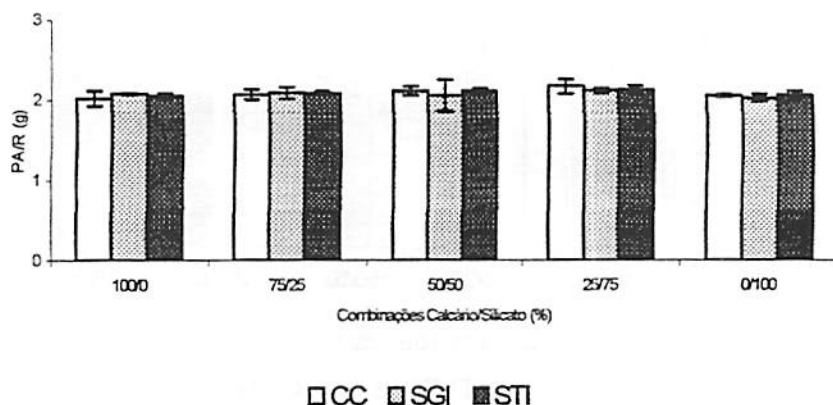


FIGURA 4 - Relação de acúmulo de massa seca na parte aérea/raízes de mudas de café da cv. Acaia, após 30 dias de cultivo nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

4.2.1.2 Avaliação das características hídricas

As plantas cultivadas na capacidade de campo apresentaram valores constantes de potencial hídrico, ao longo dos 30 dias do experimento, Fica demonstrado, com isso, o bom controle ambiental sobre a irrigação, sem variações significativas, em função das combinações de silicatos e calcário (Figura 5).

Entretanto, sob gradual imposição do déficit hídrico, os valores do potencial hídrico permaneceram elevados (ao redor de $-0,5$ MPa) até os 18 dias, e situado-se entre $-1,0$ MPa a -150 MPa, aos 24 dias. Neste período, as plantas sob suspensão total da irrigação, que estavam apresentando queda do potencial hídrico, como era de se esperar, muito rápida, atingiram, independentemente dos tratamentos, valores de $-2,5$ MPa. Ao final do experimento sob lenta imposição do déficit hídrico, a exceção da plantas do tratamento 100/0, todas as outras atingiram valores na faixa de $-1,8$ a $-2,5$ MPa.

As plantas que receberam os tratamentos 100/0, 75/25 e 0/100 mostraram os maiores crescimentos aos 30 dias de experimento (Figura 2). Considerando que $-2,5$ MPa é o valor considerado crítico para o crescimento e o desenvolvimento do cafeeiro, esses resultados demonstram que esse crescimento positivo ocorreu até os 24 dias, quando as plantas apresentaram um potencial hídrico de ou abaixo de $-1,5$ MPa, ou seja, um déficit hídrico moderado. Também Goldenberg et al. (1988) observaram que a fotossíntese permaneceu pouco afetada por potenciais hídricos foliares na faixa de $-1,5$ MPa, e em valores de $-2,0$ MPa.

O movimento estomático das plantas, aqui caracterizado pela resistência estomática (Figura 6), mostrou uma relativa relação com os valores de potencial hídrico (Figura 5). Para as plantas na capacidade de campo e sob imposição de lento déficit hídrico, os estômatos permaneceram proporcionalmente abertos, até os 30 dias de experimento, apesar dos baixos valores de potencial hídrico das

plantas sob desse último tratamento. Quando da suspensão total da irrigação, os estômatos apresentaram, para todos os tratamentos, aos 18 dias, um súbito fechamento (Figura 6). Nesse período, o potencial hídrico das plantas, à exceção daquelas do tratamento 50/50, que apresentaram um potencial hídrico de -2,0 MPa, permanecia abaixo de -1,4 MPa. Aos 24 dias, quando o potencial hídrico de todas as plantas ficou abaixo de -2,5 MPa, os mecanismos de controle de abertura e fechamento estomático, aparentemente, perderam a funcionalidade, uma vez que eles abriram e fecharam totalmente aos 30 dias. Chaves (1991) verificou que durante as fases iniciais de estresse hídrico, o fechamento dos estômatos é o principal fator limitante da fotossíntese e posteriormente, limitações fotoquímicas e aumento na resistência mesofílica passam também a ser responsáveis pela redução da fotossíntese.

A transpiração das plantas na capacidade de campo seguiu o padrão de abertura dos estômatos, permanecendo mais ou menos constante durante todo o período experimental (Figura 7). Sob imposição lenta de déficit hídrico, as plantas nas duas últimas avaliações apresentaram um baixíssimo fechamento estomático, idêntico ao daquelas sob déficit hídrico severo, que já estava ocorrendo na avaliação anterior. Esses resultados refletem mais a influência do déficit hídrico no fechamento estomático, que ocorreu por ocasião da terceira avaliação, do que do padrão de crescimento das plantas.

Em relação à adição de calcário e silicato, de maneira geral, observou-se que, depois de 24 dias de déficit hídrico imposto mais lentamente, os valores de potencial hídrico foram menores nas plantas que receberam silicato na mistura (Figura 5). Em relação à resistência estomática e à transpiração, não se detectou nenhuma diferença entre os tratamentos.

DaMatta et al. (1991), estudando o uso da água e a tolerância à seca em *Coffea canephora*, observaram que, nos genótipos sensíveis, o Ψ_w foi consideravelmente menor que nos tolerantes à seca, indicando menor capacidade

de recuperação do status hídrico foliar ao longo do período da deficiência hídrica.

Em condições de baixos potenciais hídricos foliares, o fechamento dos estômatos parece ser uma das primeiras estratégias utilizadas, pelas plantas do cafeeiro, para minimizar as perdas de água ocorridas com a transpiração. Porém, os estômatos também respondem às variações no déficit de pressão de vapor (Barros, 1997). Reduções na abertura estomática em resposta a baixos potenciais hídricos foliares têm sido relatadas por diversos trabalhos e, em geral, evidenciam a relação com diminuições na transpiração e na taxa fotossintética (DaMatta, 1991) e aumento na concentração interna de CO₂ (DaMatta, 1995).

DaMatta et al. (1993) observaram, em *Coffea arabica* cv. Catuai Vermelho, que a redução na fotossíntese, nas fases iniciais da seca, é governada, principalmente, por fatores não estomáticos, enquanto, em *Coffea canephora* cv Conilon, fatores estomáticos estariam associados com a redução do seu desempenho fotossintético.

Em relação à umidade relativa, verifica-se que a mesma foi menor para as plantas cultivadas quando da suspensão total da irrigação, não se detectando diferenças entre os demais tratamentos (Figura 8). Esses resultados refletem, em última análise, as taxas transpiratórias (Figura 7). Já para temperatura foliar e para a radiação não foi verificada nenhuma influencia da mistura calcário e silicato nos valores encontrados (Figura 9).

Combinções Calcário/Silicato (%)

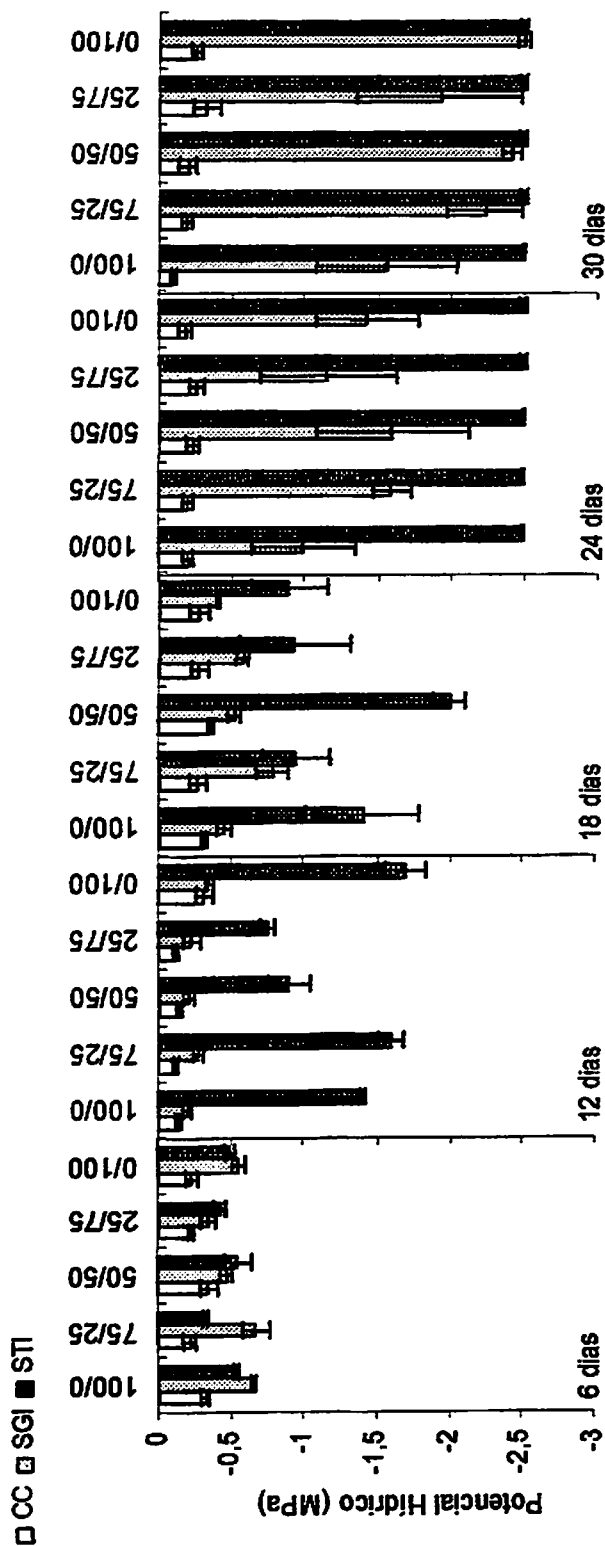


FIGURA 5 - Potencial hídrico foliar de mudas de caféiro da cv. Acaiaí, submetidas a 5 combinações de calcário/silicato, e três regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em cinco épocas de avaliação: 6 dias, 12 dias, 18 dias, 24 dias e 30 dias. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

Combinções calcário/silicato (%)

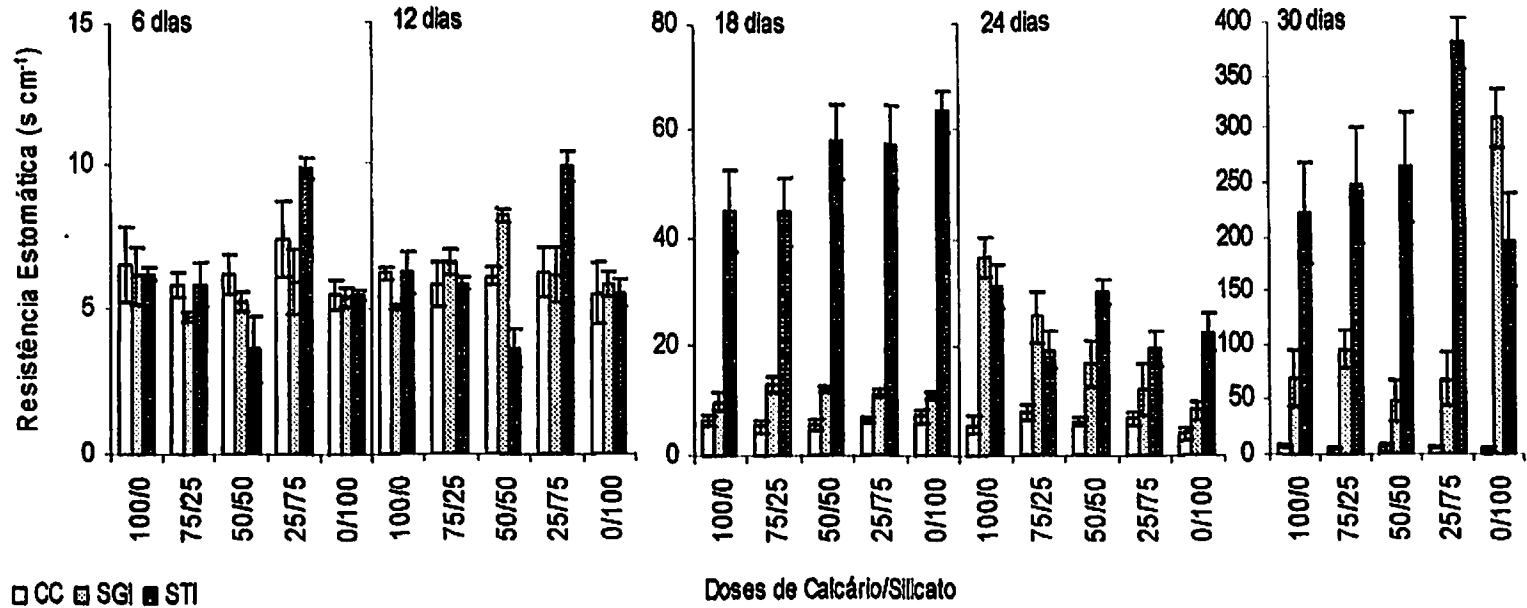


FIGURA 6 - Resistência estomática de mudas de cafeeiro da cv. Acaia, submetidas a 5 combinações de calcário/silício, e três regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em cinco épocas de avaliação: 6 dias, 12 dias, 18 dias, 24 dias e 30 dias. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

Combinações calcário/silicato (%)

30

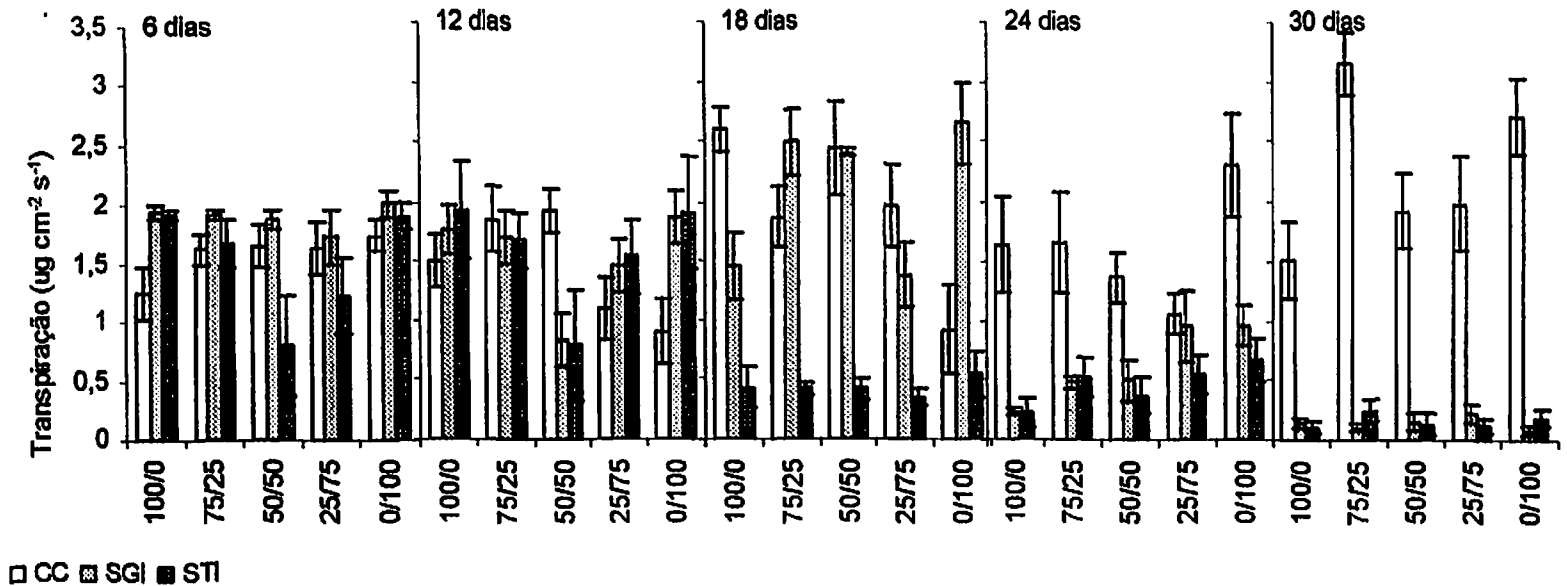


FIGURA 7 - Transpiração de mudas de cafeeiro da cv. Acaí, submetidas a 5 combinações de calcário/silício, e três regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em cinco épocas de avaliação: 6 dias, 12 dias, 18 dias, 24 dias e 30 dias. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

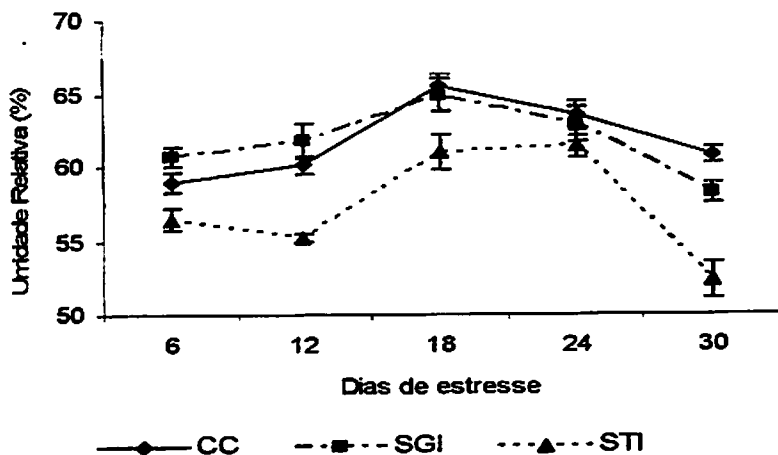


FIGURA 8 - Umidade relativa (%), em experimento com mudas de cafeeiro da cv. Acaia submetidas a três regimes hídricos: capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em cinco épocas de avaliação: 6 dias, 12 dias, 18 dias, 24 dias e 30 dias. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

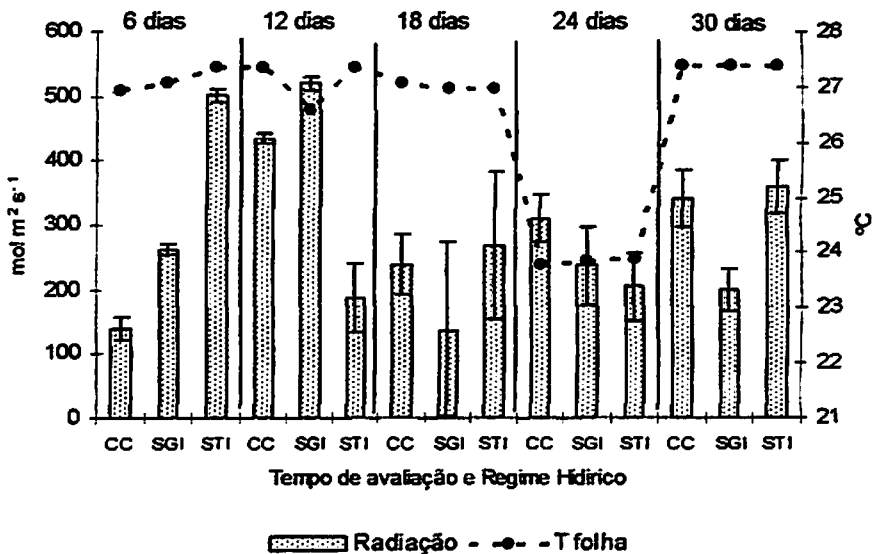


FIGURA 9 - Radiação e temperatura foliar em mudas de café da cv. Acaia submetidas a três regimes hídricos: capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI) em cinco épocas de avaliação: 6 dias, 12 dias, 18 dias, 24 dias e 30 dias. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

4.2.1.3 Avaliações anatômicas da folha

O diâmetro equatorial dos estômatos não variou em função dos regimes hídricos adotados e nem com as diferentes combinações de calcário e silicato (Figura 10). Já o diâmetro polar variou em função dos tratamentos (Figura 11). Na suspensão total da irrigação, ocorreu aumento em função da quantidade de silício adicionada na mistura e nos tratamento na capacidade de campo e suspensão lenta da irrigação, ele diminuiu, adquirindo um formato elipsóide.

A relação entre os diâmetros polar e equatorial mostrou que, na suspensão total da irrigação, ela aumentou com o silício na mistura (Figura 12). Nos demais tratamentos, não houve variações significativas. Esses

resultados mostram que o silício, em cafeeiros com restrição hídrica, faz com que os estômatos adquiram um formato mais elipsóide o que, segundo Rocha (2005), os torna mais funcionais.

Em geral, folhas com estômatos menores apresentam maior eficiência de uso da água e a diferença no tamanho da abertura estomática apresenta maior efeito sobre a difusão de água do que sobre a difusão de CO₂ (Abrams et al., 1994). Para Kozłowski et al. (1991), contudo, a capacidade de resposta dos estômatos às variáveis ambientais é mais importante para a determinação da condutância estomática do que o seu número.

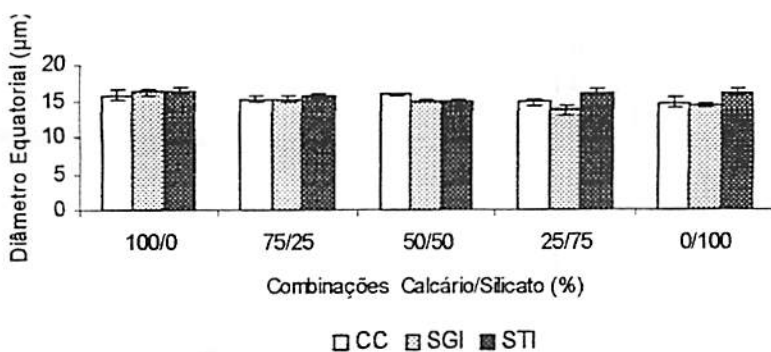


FIGURA 10 - Diâmetro equatorial (μm) em folhas de mudas de cafeeiro da cv. Acaiaí, após 30 dias de cultivo, nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

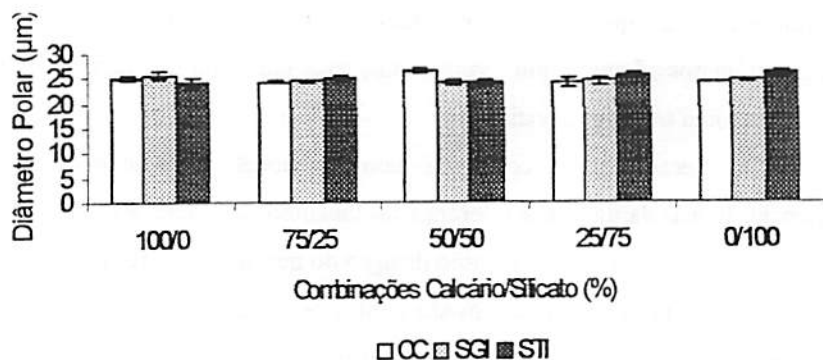


FIGURA 11 - Diâmetro polar (μm) em folhas de mudas de cafeeiro da cv. Acaiá, após 30 dias de cultivo, nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

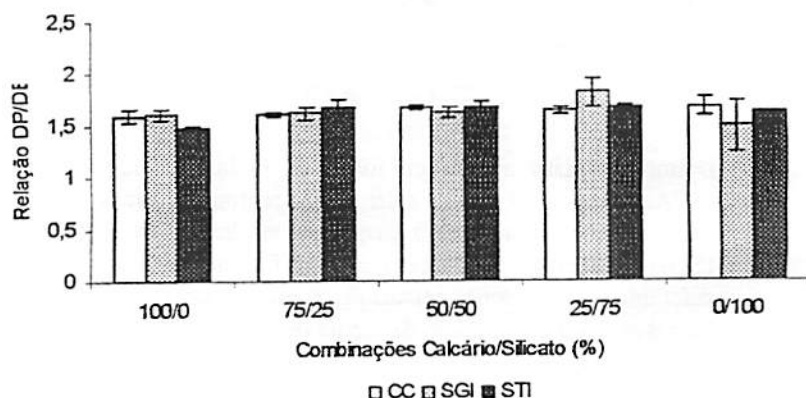


FIGURA 12 - Relação entre diâmetro polar/equatorial (μm), em folhas de mudas de cafeeiro da cv. Acaiá, após 30 dias de cultivo nos regimes hídricos capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

A espessura da epiderme adaxial de plantas na suspensão total da irrigação aumentou com a presença de silício (Figura 13). Esse aumento também foi observado sob capacidade de campo, especialmente nas maiores quantidades desse elemento. A epiderme abaxial não mostrou nenhuma variação. Pozza (2004) também observou a presença de uma cutícula mais espessa, porém, na epiderme abaxial, a qual a autora atribuiu ser a responsável pela diminuição do número de lesões de *Cercospora coffeicola* nas cultivares Mundo Novo e Catuai.

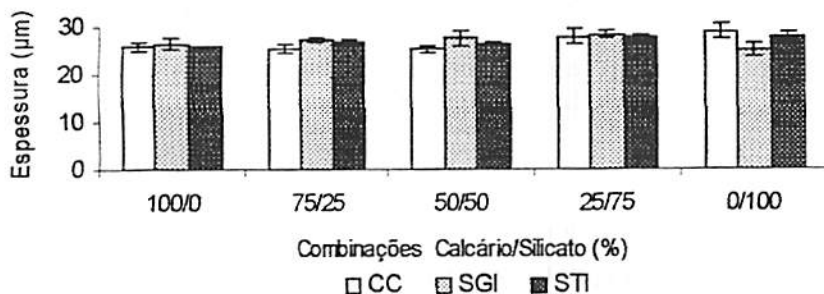


FIGURA 13 - Espessura do tecido epidérmico adaxial em folhas de mudas de cafeeiro da cv. Acaiá, após 30 dias de cultivo nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

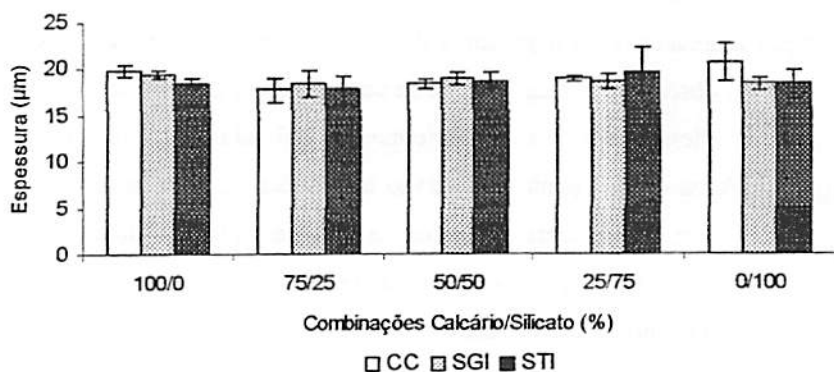


FIGURA 14 - Espessura do tecido epidérmico abaxial em folhas de mudas de cafeeiro da cv. Acaia após 30 dias de cultivo nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

Para o parênquima esponjoso, a diferença mais evidente foi verificada nas folhas de plantas sob capacidade de campo, quando substituiu-se o calcário por silício em 75% e 100% (Figura 14). Já o parênquima paliçádico e a razão parênquima paliçádico/limbo foliar também não apresentaram diferenças significativas em nenhuma situação estudada (Figura 15 e 16). As variações na estrutura das folhas estão relacionadas, em grande parte, com o hábitat, representando uma importante resposta plástica das plantas às condições ambientais, especialmente a disponibilidade hídrica (Dias et al., 2005).

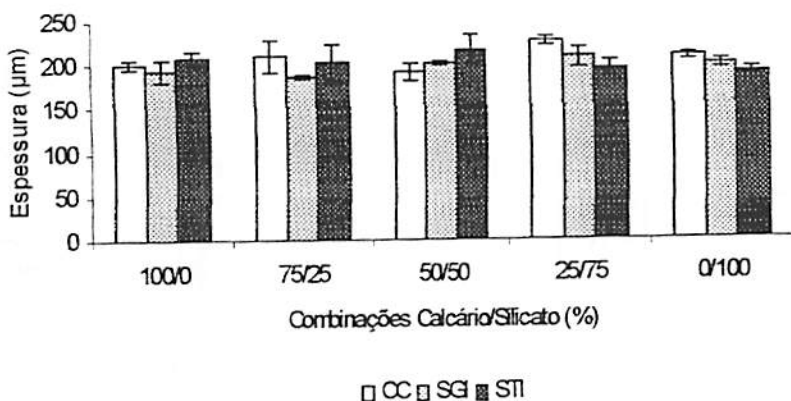


FIGURA 15 - Espessura (μm) do parênquima esponjoso em folhas de mudas de cafeeiro da cv. Acaiá, após 30 dias de cultivo nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

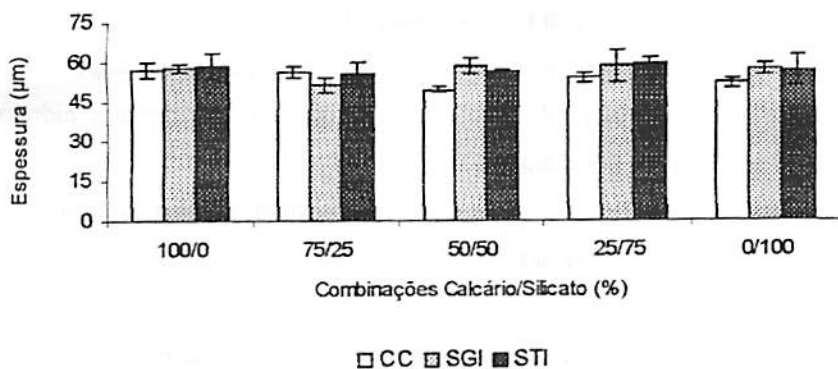


FIGURA 16 - Espessura (μm) do parênquima paliçádico em folhas de mudas de cafeeiro da cv. Acaiá, após 30 dias de cultivo nos regimes hídricos, capacidade de campo (CC), suspensão gradual da irrigação (SGI) e suspensão total da irrigação (STI), em solo com diferentes combinações calcário/silicato de cálcio. As barras representam o erro padrão da média de 3 repetições. UFLA, Lavras, MG, 2007.

5 CONCLUSÕES

Nas condições em que foram realizados os experimentos conclui-se que as diferentes combinações entre calcário e silicato de cálcio não interferiram no desenvolvimento das plantas na capacidade de campo. Sob condições de estresse hídrico, observou-se uma melhor resposta fisiológica quando se utilizou a combinação 75/25 e 0/100 de calcário/silicato de cálcio, mostrando que a substituição pode ser vantajosa, principalmente em regiões nas quais os silicatos de cálcio ou escórias de siderurgia são facilmente obtidos. Entretanto, experimentos de campo devem ser realizados para testar os resultados previamente obtidos no presente experimento, realizado com mudas, em ambiente controlado e em curto prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, M. D.; KUBISKE, M. E.; MOSTOLLER, S. A. Relating wet and dry year ecophysiology to leaf structure in contrasting temperate tree species. *Ecology*, Washington, v. 75, n. 1, p. 123-133, Jan. 1994.

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

ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas.** São Paulo: ANDA, 1992. (Boletim Técnico, 6).

BARBER, D. A.; SHONE, M. G. T. The absorption of silica from aqueous solutions by plants. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 17, n. 52, p. 569-578, 1966.

BARROS, I. de. **Produção das variedades caturra e mundo novo de café em função do espaçamento, número de plantas por cova e condução das plantas.** 1997. 82 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

BARROS, R. S.; MAESTRI, M.; VIEIRA, M. BRAGA FILHO, L.J. Determinação da área de folhas de café (*Coffea arabica* L. cv. Bourbon Amarelo). *Revista Ceres*, Viçosa, v.20, n. 107, p. 44-52, jan. 1973.

BARUCH, Z.; MÉRIDA, T. Effects of drought and flooding on root anatomy in four tropical forage grasses. *International Journal the Plant Science*. Chicago, Chicago, v. 156, n. 4, p. 514-521, July 1995.

BRAY, E. A Plant responses to water deficit. *Trends in Plant Science*, Oxford, v. 2, n. 2, p. 48-54, Feb. 1997.

CARNEIRO, C. E. A.; FIORETTO, R. A.; FONSECA, I. C. B. F.; CARNEIRO, G. E. de S. CALPOT, fosfato e silício co-aplicados ao solo para a cultura da soja. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 27, n. 1, p. 5-12, jan./mar. 2006.

CHAVES, M. M. Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 42, n. 234, p. 1-16, Jan. 1991.

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. 1994.

DaMATTA, F. M. Alguns aspectos das relações hídricas em cultivares de *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora*. 1991. 45 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

DA MATTA, F. M. Desempenho fotossintético do cafeeiro em resposta a tensões abióticas. 1995. 67 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

DA MATTA, F. M. et al. Water relations of coffee leaves (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*) in response to drought. *Journal of Horticultural Science*. London, v. 68, n. 5, p. 741-746, Sept. 1993.

DIAS, P.C.; ARAÚJO, W.L.; MORAES, G. A B. K. de; POMPELLI, M. F.; BATISTA, K. D.; CATEN, T. A.; VENTRELLA, M. C.; DaMATTA, F. M. crescimento e alocação de biomassa em duas prog-ênies de café submetidas a deficit hídrico moderado. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4., 2005, Londrina, PR. Resumos expandidos... Brasília: Embrapa café, 2005. ICD-ROM.

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

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.

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

FARIA, R. Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz do sequeiro ao déficit hídrico do solo. 2000. 125 p. Dissertação (Mestardo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

FAWE, A.; ABOU-ZAID, M.; MENZIES, J. G.; BELANGER, R. R. Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. *Phytopatology*, St. Paul, 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.

GOLBERG, A. D.; RÉNARD, C.; LANNOYE, R.; LEDENT, J. F. Effects and after-effects of water stress on chlorophyll fluorescence transients in *Coffea canephora* Pierre and *Coffea arabica* Apot and Aké Assi. *Café Cacao Thé*, Paris, v. 32, n. 1, p. 11-16, jan./mar. 1998.

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.

KORNDÖRFER, G. H.; GASHO, 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.

KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A. Efficiency of calcium silicate and carbonate in soybean disease control. *Jouranal of Plant Nutrition*, New York, n. 11, p. 2049-2061, Nov. 2006.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. de. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004. p. 28. (Boletim técnico 01.).

KOZLOWSKI, T.; KRAMER, P. J.; PALLARDY, S. G. **The physiological ecology of woody plants**. London: Academic Press, 1991. 657 p.

KRAUS, J. E.; ARDUIM, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Rio de Janeiro: Seropédica, 1997. 198 p.

KUMAR, D.; TIESZEN, L. L. Photosynthesis in *Coffea arabica*. II Effects of water stress. *Experimental Agriculture*, Cambridge, v. 16, n. 1, p. 21-27, Jan. 1980.

LABOURIAU, L. G.; OLIVEIRA, J. G.; SALGADO-LABOURIAU, M. L. Transpiração de *Schizolobium parahyba* (Vell) Toledo I. Comportamento na estação chuvosa, nas condições de Caeté, Minas Gerais. *Anais da Academis Brasileira de Ciência*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 237-257, out./dez. 1961.

LEITE, A. M. C.; LLERAS, E. Ecofisiologia de plantas da Amazônia: anatomia foliar e ecofisiologia de *Pogonophora schomburgkiana* Miers. (Euphorbiaceae). *Acta Amazônica*, Manaus, v. 8, n. 3, p. 365-370, set. 1978.

LIAN, S. Silica fertilization of rice. In: Food and Fertilizer technology Center. **The fertility of padd soils and fertilizer applications for rice**. Taiwan, 1976. p. 197-220.

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

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

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

MARTIM, S. A. **Pulverização do cafeeiro com Açúcar: potencial de uso em medas submetidas à deficiência hídrica e na recuperação de plantas atingidas por Glyphosate**. 2003. 67 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

NOGUEIRA, R. M. C.; ARAÚJO, E. de L.; WILLADINO, L. G.; CAVALCANTE, U. M. T. **Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas**. Recife: UFRPE, Imprensa Universitária, 2005. 500 p. Palestras.

NUNES, M. A.; RAMALHO, J. D. C.; DIAS, M. A. Effect of nitrogen supply on the photosynthetic performance of leaves from coffee plants exposed to bright light. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 44, n. 262, p. 893-899, May 1993.

POZZA, A. A. A. **Silício em mudas de cafeeiro: efeito na nutrição mineral e na susceptibilidade à cercosporiose em três variedades**. 2004. 83 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

QUEIROZ, A. A. Efeito do silício no controle das principais doenças do arroz irrigado no estado do Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2003. **Livro de resumos...** 2003.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. V. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viosa: CFSEMG, 1999. 359 p.

ROCHA, H. S. **Luz e sacarose na micropropagação da bananeira “Prata Anã”: alterações morfoanatômicas**. 2005. 98 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SANTINATO, R.; PEREIRA, J. E.; OLIVEIRA, J. A.; SILVA, O. A. Calagem em doses crescentes e em cobertura na formação do cafeeiro em solo LVA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA CAFEEIRA, 7., 1979, Araxá. **Resumos...** Rio de Janeiro: IBC-GERCA, 1979. p. 337-41.

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.

SHARP, R. E.; DAVIES, W. J. Root growth and water uptake by maize plants in drying soil. *Journal Experimental Botany*, Oxford, v. 36, n. 170, p. 1441-1456, Sept. 1985.

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

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.