

ÍNDICE DE CLOROFILA EM PLANTAS DE ARROZ DE TERRAS ALTAS SUBMETIDAS A ESTRESSE POR ALUMÍNIO E APLICAÇÃO DE SILÍCIO

Lucas Barbosa de Freitas¹, Dirceu Maximino Fernandes¹ e Suelen Cristina Mendonça Maia¹

¹Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista – FCA/UNESP, Departamento de Solos e Recursos Ambientais, Campus de Botucatu. Rua José Barbosa de Barros, 1780, CEP: 18603-970, Caixa Postal 237, Fazenda Experimental Lageado, Botucatu, SP. E-mail: lucasbarbosaf@yahoo.com.br, dmfernandes@fca.unesp.br e suelen.maia@yahoo.com.br

RESUMO: A aplicação de Si em plantas tem promovido além de melhor incidência de luz devido a proporcionar as plantas melhor arquitetura foliar, maior absorção de CO₂, diminuição da transpiração excessiva, aumento do conteúdo de clorofila nas folhas e permitindo incremento da taxa fotossintética, em especial em situação de estresse para a planta. Desta maneira, objetivou-se avaliar o índice SPAD e ângulo foliar em plantas de arroz de terras altas submetidas ao estresse por Al³⁺ e aplicação de Si. Foram conduzidos três experimentos (I – solução nutritiva; II – solo textura média arenosa; III – solo textura média argilosa). O delineamento experimental utilizado nos três experimentos foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 2x5, com quatro repetições. Os tratamentos foram dois cultivares de arroz de terras altas, BRS Talento - não tolerante e Guarani - tolerante ao Al³⁺ e cinco doses de Si (0, 30, 60, 90 e 120 mg dm⁻³). As variáveis avaliadas foram, ângulo foliar em 3 pontos na folha (Experimento I) e índice SPAD (Experimentos I, II e III). O Si não contribui para o aumento do índice SPAD das plantas sob estresse por Al³⁺. A aplicação de Si proporcionou menor ângulo foliar das plantas sob estresse por Al³⁺, tornando-as mais eretas.

Palavras-chave: ângulo foliar, SPAD, magnésio.

Chlorophyll index on upland rice plants under aluminum stress and silicon application

ABSTRACT: Si application on plants has promoted beyond best light incidence, greater CO₂ absorption and decrease excessive transpiration, allowing rate of photosynthesis increasing rate and leaf chlorophyll content, especially in stress situations for plant. Thus, aimed to evaluate SPAD index and leaf angle in upland rice plants under Al³⁺ stress and Si application. Were conducted three experiments (I – nutrient solution; II – sandy soil; III – clayey soil). The experimental design utilized on all of the three experiments, was randomized block design, in 2x5 factorial arrangement, with four replications. Treatments were two cultivars of upland rice, BRS Talent - not tolerant and Guarani - tolerant to Al³⁺ and five Si rates (0. 30. 60. 90 and 120 mg dm⁻³). The variables evaluated were, leaf angle in 3 points (Experiment I) and SPAD index (Experiments I, II and III). The Si does not contribute to the increase in the SPAD index of plants under Al³⁺ stress. The Si application promotes less angle leaf plants, making them more standing in plants under Al³⁺ stress.

Key words: leaf angle, SPAD, magnesium.

INTRODUÇÃO

A toxicidade ao alumínio (Al³⁺) é um dos principais limitantes da produtividade em solos ácidos. O principal sintoma de toxidez por Al³⁺ causado as plantas é a inibição do crescimento e desenvolvimento das raízes (Kochian, 1995), consequentemente, influenciando

negativamente também a absorção radicular de água e nutrientes (Wang et al., 2006). Dessa forma, as plantas afetadas apresentam redução de crescimento e conseqüentemente produtividade. Assim, a utilização de elementos benéficos que possam melhorar sua nutrição seria de grande interesse.

Plantas de arroz de terras altas absorvem e acumulam elevadas quantidades de silício (Si) (Pereira et al., 2007), elemento este considerado benéfico (Epstein, 1999; Korndörfer, 2006). Nas plantas, seu efeito mais evidente é observado em cultivos sob condições de estresse (Ma, 2004). Isto ocorre porque o Si é capaz de proteger as plantas contra vários estresses bióticos e abióticos (Lux et al., 2002; Ma e Yamaji, 2006), entre eles o estresse por Al^{3+} . A adubação com Si tem sido interessante no intuito de insolubilizar o Al^{3+} pela interação benéfica entre Si e Al^{3+} (Hodson e Evans 1995; Ma et al., 1997; Cocker et al., 1998; Hodson e Sangster, 1999; Britez et al., 2002; Jansen et al., 2003; Wang et al., 2004; Freitas et al., 2012).

Ainda, o acúmulo de silício na cutícula (epiderme) determina alterações na arquitetura foliar, podendo proporcionar plantas mais ereta, favorecendo assim, a incidência de luz sob as folhas velhas por diminuir o auto-sombreamento e evitando o acamamento (Korndorfer, 2006; Epstein e Blomm, 2006).

Em plantas sob estresse, o uso do Si tem promovido além de melhor incidência de luz, maior absorção de CO_2 e diminuição da transpiração excessiva, permitindo incremento da taxa fotossintética (Deren et al., 1994; Savant et al., 1997) e aumento do conteúdo de clorofila nas folhas (Epstein, 2001; Al-aghabary et al., 2004; Silva et al., 2012). Todos esses benefícios citados podem aumentar mesmo que indiretamente a fotossíntese da planta (Tamai e Ma, 2008).

A medida indireta de clorofila ou índice SPAD (Soil Plant Analysis Development) tem sido obtida com o clorofilômetro portátil (Malavolta et al., 1997). Os valores SPAD obtidos pelo clorofilômetro são proporcionais ao teor de clorofila presente na planta. Como cerca de 50 a 70% do N total na folha é constituinte da clorofila e está envolvido na carboxilação de enzimas presentes nos cloroplastos e nas reações fotossintéticas (Pan et al., 2004; Taiz e Zeiger, 2009), o índice SPAD geralmente, correlaciona-se bem com o teor de N na folha (Silveira et al., 2003; Godoy et al., 2008). Ainda o índice SPAD pode ser um método eficiente para auxiliar na determinação do estado nutricional das plantas (Argenta et al., 2001).

Dessa forma a aplicação de Si pode ser uma ferramenta interessante, em especial em solos com altos níveis de Al^{3+} , visando diminuir a toxidez por esse elemento, conseqüentemente aumentar a eficiência fotossintética das plantas. Assim, os objetivos desse

trabalho foram avaliar o índice SPAD e ângulo foliar em plantas de arroz de terras altas submetidas ao estresse por Al^{3+} e aplicação de Si.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos três experimentos, sendo o primeiro em casa de vegetação (Experimento I) conduzido em solução nutritiva, o segundo e o terceiro em túnel plástico utilizando vaso com solo Latossolo Vermelho Escuro, textura média arenosa (Experimento II) e textura média argilosa (Experimento III). Os experimentos foram conduzidos junto ao Departamento de Recursos Naturais – Ciência do Solo da Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Botucatu.

O delineamento experimental foi o mesmo para os três experimentos, utilizando blocos casualizados, em esquema fatorial 2×5 , com quatro repetições. Os tratamentos foram dois cultivares de arroz de terras altas, BRS Talento - não tolerante e Guarani - tolerante ao Al^{3+} e cinco doses de Si (0, 30, 60, 90 e 120 mg dm^{-3}).

Experimento I

Foi utilizada solução nutritiva descrita por Furlani e Furlani (1988) e vasos com capacidade para quatro litros, com seis plantas por vaso. As plantas permaneceram por sete dias na solução nutritiva à meia força iônica. Após uma semana a solução nutritiva foi trocada por força total sem os tratamentos com silício e permaneceram nessa solução por duas semanas.

Após o período inicial, a solução nutritiva foi trocada e os tratamentos com Si foram adicionados, permanecendo assim por duas semanas. A fonte de Si utilizada foi o silicato de potássio, sendo o potássio reduzido em coluna catiônica. O silicato continha as seguintes garantias: $156000 \text{ mg dm}^{-3}$ de Si e 88 mg dm^{-3} de K.

Posteriormente trocou-se a solução nutritiva, retirando o Si e adicionando 40 mg dm^{-3} de Al^{3+} , sob a forma de $AlK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, fonte esta recomendada por Furlani e Furlani (1988).

Portanto, as plantas permaneceram quatorze dias na solução nutritiva com Si e em seguida, trocou-se a solução retirando o Si e adicionando o Al^{3+} , permanecendo mais sete dias na solução nutritiva. Após os sete dias em contato com o Al^{3+} realizou-se a colheita do experimento.

Utilizou-se o clorofilômetro portátil (SPAD-502) para as avaliações de índice SPAD, duas vezes no período de condução do experimento, sendo que a primeira vez foi após as

plantas estarem em contato com o Si por 14 dias e a segunda após as plantas estarem em contato com o Al^{3+} por sete dias. A folha utilizada para as avaliações foi a última folha completamente expandida.

O ângulo de inserção das folhas foi aferido com o auxílio de um transferidor. A referência para as medidas foi o colmo principal das plantas de arroz e os resultados foram dados em graus ($^{\circ}$). Aferiram-se três pontos da última folha completamente desenvolvida de cada planta, sendo: Ponto 1-base da folha; Ponto 2-meio da folha; Ponto 3-ponta da folha. Foram aferidas quatro plantas por parcela experimental.

Experimento II e III

Os solos utilizados nos experimentos II e III foram de baixa fertilidade natural e alumínico ($\text{m\%} > 50$). O solo utilizado no experimento II foi classificado como Latossolo Vermelho Escuro, textura média arenosa, que apresentava as seguintes características químicas antes da instalação do experimento: 7 mg dm^{-3} de fósforo; 15 g dm^{-3} de MO; 4,1 pH em CaCl_2 ; 0,7; 5; 3; 69; 11; 78 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K, Ca, Mg, H+Al, Al^{3+} , CTC respectivamente; 2 mg kg^{-1} de Si e $\text{V\%} = 11$.

Para o experimento III foi utilizado solo classificado como Latossolo Vermelho Escuro, textura média argilosa, apresentando as seguintes características químicas antes da instalação do experimento: 5 mg dm^{-3} de fósforo; 22 g dm^{-3} de MO; 4,2 pH em CaCl_2 ; 0,8; 4; 4; 77; 10; 86 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K, Ca, Mg, H+Al, Al^{3+} , CTC respectivamente; 6 mg kg^{-1} de Si e $\text{V\%} = 10$.

A condução dos experimentos II e III foi a mesmas, na qual utilizou-se como parcela experimental vasos com capacidade para 40 litros de solo ($0,4 \times 0,4 \times 0,3 \text{ m}$). Antes da semeadura as sementes foram tratadas com carboxin + tiram ($60 + 60 \text{ g do i.a. por } 100 \text{ kg de sementes}$) e tiametoxam ($140 \text{ g do i.a. por } 100 \text{ kg de semente}$). A semeadura dos dois cultivares de arroz foi realizada no dia 08 de janeiro de 2010, utilizando-se 100 sementes em $0,40 \text{ m}$ por unidade experimental. Após a emergência das plântulas foi realizado desbaste, de modo que cada unidade experimental apresentasse 30 plantas.

Na adubação de semeadura foi aplicado 33, 300 e 150 mg dm^{-3} de N, P e K respectivamente. Como fonte de macronutrientes utilizou-se uréia, superfosfato triplo, cloreto de potássio. O N foi aplicado duas vezes em cobertura usando a mesma quantidade da semeadura em cada aplicação. O cloreto de magnésio foi aplicado visando fornecer Mg ao solo, na dose de $\frac{1}{4}$ do Ca fornecido pelo superfosfato triplo aplicado.

A fonte de Si utilizada foi o silicato de potássio, o qual apresentou as seguintes garantias: 15% de Si; 25% de SiO₂ e 15% de K₂O. O K foi balanceado em todas as parcelas em que foi aplicado silicato de potássio, com a adição de KCl, até atingir o nível de K (150 mg dm⁻³). A adubação silicatada foi realizada logo após a semeadura, solubilizando o silicato de potássio em água e aplicado sobre a superfície do solo.

O florescimento pleno dos cultivares ocorreu aos 83 e 101 dias após a semeadura (DAS) para o Guarani e BRS Talento respectivamente, nessa época foram realizadas as avaliações do índice SPAD utilizando-se o clorofilômetro. Foram aferidas cinco folhas bandeiras por parcela experimental. Ainda no florescimento coletou-se amostras de folhas bandeiras para análise de magnésio (Mg), segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Os cultivares foram comparados pelo teste F ($P < 0,05$), enquanto os efeitos das doses de Si foram avaliados por meio de análise de regressão. Visando diferenciar o comportamento dos cultivares, nas interações utilizou-se o método estatístico “não protegido” citado por Vieira (1999), dessa forma, os modelos foram escolhidos baseando-se na significância da regressão pelo teste F ($P < 0,05$), e no coeficiente de determinação.

Foram estabelecidas correlações lineares como medida de dependência entre teor de Mg e índice SPAD. A fim de verificar a significância do coeficiente de correlação, utilizou-se o teste t.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Experimento I

O Si não influenciou o índice SPAD em ambos cultivares, mesmo após as plantas estarem em contato com o Si ou após Al³⁺ (Figura 1A e B), dessa forma contrariando a hipótese formulada de que o Si pode incrementar o conteúdo de clorofila nas folhas de plantas sob estresse (Epstein, 2001; Al-aghaby et al., 2004; Silva et al., 2012). Cabe ressaltar que apesar de a literatura citar incremento de índice de clorofila proporcionado pelo Si em plantas, não há informações sobre esse benefício proporcionado pelo Si em plantas sob estresse por Al³⁺.

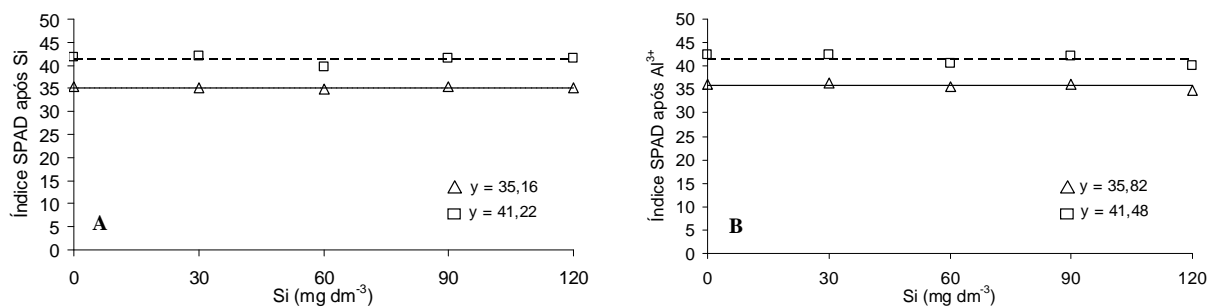


Figura 1 – Índice SPAD, após 14 dias em contato com silício (A) e após 7 dias em contato com Al³⁺ (B) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square).

Por outro lado, o Si contribuiu para o decréscimo do ângulo das folhas nos três pontos avaliados (Figura 2). Dessa forma fica evidente a contribuição do Si para que a planta apresente arquitetura foliar mais ereta, assim, favorecendo a incidência de luz em toda parte aérea, no entanto, isso não se traduziu em maior índice SPAD nas folhas (Figura 1).

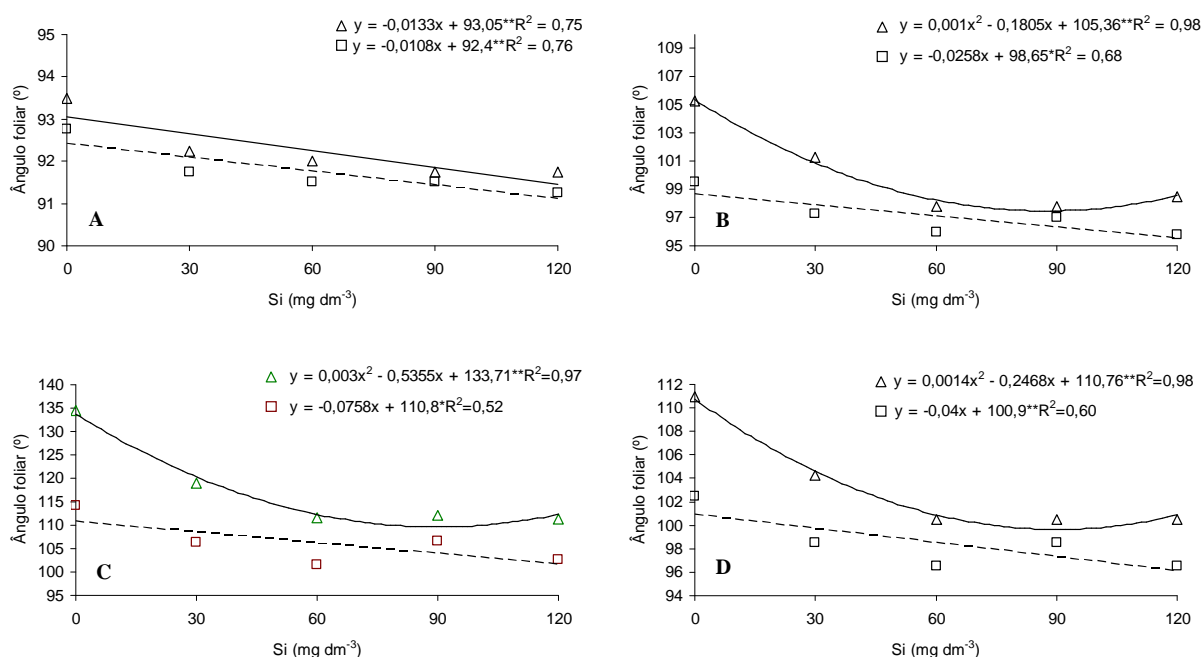


Figura 2 – Ângulos foliares, ponto 1 (A), ponto 2 (B), ponto 3 (C) e média geral dos pontos (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício aplicadas em solução nutritiva. * e ** são, respectivamente, significativos a 5% e 1% pelo teste t.

Pode-se considerar que no momento da avaliação das plantas em solução nutritiva, estas estavam com poucas folhas, não havendo efeito sombreamento, assim, mesmo com plantas mais eretas, não foi suficiente para aumentar o índice SPAD.

Ao comparar os cultivares quanto ao índice SPAD, o cultivar BRS Talento apresentou valores mais elevados tanto nas plantas inicialmente em contato com o Si, quanto

posteriormente com o Al^{3+} (Tabela 1). Devido ao maior estresse causado por Al^{3+} , esperava-se que o cultivar sensível ao Al^{3+} obtivesse menor índice SPAD, porém, não foi o observado, resultado que pode ser explicado pela maior interceptação de luz e síntese de clorofila proporcionada pelo menor ângulo foliar obtido por esse cultivar em comparação ao Guarani (Tabela 2).

Tabela 1 – Média do índice SPAD na folha das plantas após 14 dias em contato com silício e após 7 dias em contato com alumínio nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento

Cultivares	Silício	Alumínio
----Índice SPAD ----		
Guarani	35,2b	35,8b
BRS Talento	41,2a	41,5a
CV(%)	2,74	4,77

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade.

Tabela 2 – Média de ângulo foliar das plantas em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento cultivados em solução nutritiva

Cultivares	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média geral
----- (°) -----				
Guarani	92,2b	100,1b	117,6b	103,3b
BRS Talento	91,7a	97,1a	106,2a	98,5a
CV(%)	0,7	2,0	5,6	2,6

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade.

Quanto ao ângulo foliar, em todos os pontos avaliados o cultivar BRS Talento apresentou-se menor valor (Tabela 2), ou seja, com folhas mais eretas em comparação ao cultivar Guarani. Talvez isso possa relacionar o menor ângulo foliar das plantas do cultivar BRS Talento ao seu maior índice SPAD. Ou, é possível que o cultivar BRS Talento seja mais eficiente fotossinteticamente, pelo fato de ser melhorado geneticamente (Grupo moderno), e dessa forma o cultivar tenha melhor arquitetura foliar e melhor eficiência fotossintética, por consequência maior índice SPAD.

Experimento II e III

O Si não proporcionou incremento do índice SPAD das folhas de plantas de arroz de terras altas, cultivadas sob estresse por Al^{3+} em solo de textura média arenosa – Experimento II (Figura 3A). Resultados que estão de acordo com Freitas et al. (2011), que aplicaram doses crescentes de Si na cultura do milho e não observaram aumento do índice SPAD na folha.

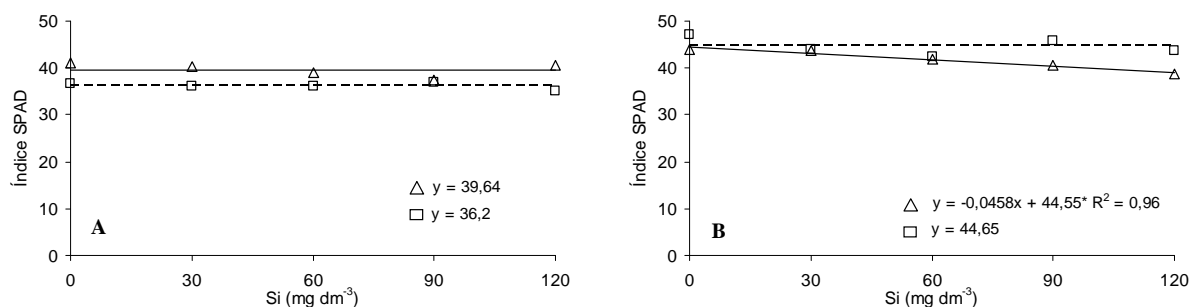


Figura 3 – Índice SPAD, experimento solo arenoso (A) e experimento solo argiloso (B) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício. * e ** são, respectivamente, significativos a 5% e 1% pelo teste t.

Em contrapartida, no experimento III, em solo médio argiloso, ao aplicar Si houve decréscimo do índice SPAD, somente no cultivar tolerante ao Al^{3+} (Figura 3B). Isso pode estar relacionado ao comportamento do teor de Mg na folha bandeira deste cultivar, pois houve correlação entre índice SPAD e teor de magnésio (Mg) (Tabela 3). Conforme se aumentou as doses de Si houve decréscimo no teor de Mg e do índice SPAD. Isso pode ter ocorrido, pois, o Mg faz parte da molécula central da clorofila (Mengel e Kirkby, 1979), sendo assim, ao diminuir o teor de Mg na folha, conseqüentemente ocorreu o mesmo para índice SPAD.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação linear simples entre índice SPAD e teor de Mg na folha bandeira do cultivar de arroz de terras altas Guarani em função da aplicação de Si

Variável	Teor de Mg
Índice SPAD	0.518*

*, significativo a 5% pelo teste t.

Esse comportamento ocorreu somente no solo argiloso, fato este que pode ser explicado pela relação da concentração Ca e Mg do solo antes do plantio. A concentração de Ca e Mg no solo argiloso era de 4 mmol_c dm⁻³ de Ca para 4 mmol_c dm⁻³ de Mg e foi aplicado superfosfato triplo e cloreto de magnésio.

Ao aplicar Ca e Mg via fertilizantes pode ter causado desbalanceamento dessas bases no solo provocando desequilíbrio no complexo de troca (Sousa et al., 2007) e influenciando a absorção de Mg pela planta. Talvez, no solo argiloso fosse necessária aplicação de Mg em quantidade diferente do solo arenoso.

Ainda, há possibilidade de que também tenha ocorrido interação entre o N e o Si, onde o H_3SiO_4 e o NO_3^- , podem concorrer pelo mesmo sítio de absorção (Wallace et al., 1976; Wallace, 1989), o que pode ter diminuído o acúmulo de N na parte aérea e por conseqüência o

índice SPAD. É importante citar que o decréscimo do índice SPAD ocorreu somente no cultivar Guarani cultivado em solo argiloso.

Mauad et al. (2003), trabalhando com doses de nitrogênio e silício em arroz de terras altas observaram que os teores de silício na planta decrescem conforme aumentam as doses de nitrogênio em cobertura. Também, Fallah (2012) demonstrou que a aplicação de doses de N interfere no teor de Si na planta e que, quando a adubação nitrogenada é baixa, os teores de Si na planta têm aumentos mais pronunciados, quando comparados com as doses mais elevadas de N. O que não foi o caso no presente experimento, pois a quantidade de N foi adicionada de forma igualitária a todas as parcelas.

Por outro lado, Ávila et al. (2010) estudando aplicação de Si e N em arroz de terras altas, observou aumento do índice SPAD com a aplicação de Si, deixando claro que a interação Si x N é específica e ocorre em determinadas condições.

É possível que nas condições do presente experimento na qual o solo é ácido e alumínico, o comportamento da interação Si x N seja diferente de condições normais de cultivo sem estresses nutricionais, necessitando assim de estudos mais detalhados para sua completa elucidação.

Ainda, é bom citar que aplicando o fertilizante nitrogenado uréia no experimento, o aumento do teor de amônio (NH_4^+) pode ter diminuído o teor de Si disponível no solo, pois pode haver formação de polímeros de Si com o NH_4^+ (Ma e Takahashi, 2002). Oliveira et al. (2007) citam que o N fornecido na forma amoniacal pode diminuir em até 32% a absorção de Si em arroz.

Na comparação entre cultivares, para o solo de textura média arenosa, o cultivar Guarani apresentou maior índice SPAD (Tabela 4), o que era esperado para as condições do experimento, com solo contendo altos teores de Al^{3+} .

No experimento III, com solo de textura média argilosa, o cultivar BRS Talento apresentou maior índice SPAD (Tabela 4). Como o solo de textura média argilosa apresentou-se em melhores condições de fertilidade em comparação ao solo de textura média arenosa, é possível que o cultivar BRS Talento tenha obtido maior índice SPAD devido a ter se adaptado melhor as condições do experimento, já que o cultivar é melhorado geneticamente e tem maior potencial produtivo, conseqüentemente é mais exigente em fertilidade do solo.

CONCLUSÕES

O Si não contribui para o aumento do índice SPAD de plantas de arroz de terras altas sob estresse por Al^{3+} .

A aplicação de Si proporcionou menor ângulo foliar das plantas sob estresse por Al^{3+} , tornando-as mais eretas.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão de bolsa ao primeiro autor (processo nº 2009/03351-3) e pelo financiamento do projeto (processo nº 2009/15258-8). Ao CNPq, pela concessão de bolsa ao segundo autor.

REFERÊNCIAS

- AL-AGHABARY, K.; ZHU, Z.; SHI, Q. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzyme activities in tomato plants under salt stress. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.27, n.12, p.2101–2115, 2004.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G. Teor de clorofila na folha como indicador do nível de N em cereais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.31, n.4, p.715-722, 2001.
- ÁVILA, F.W.; BALIZA, D.P.; FAQUIN, V.; ARAÚJO, J.L.; RAMOS, S.J. Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.41, n.2, p.184-190, 2010.
- BRITZ, R.M.; WATANABE, T.; JANSEN, S.; REISSMANN, C.B.; OSAKI, M. The relationship between aluminium and Silicon accumulation in leaves of *Faremea marginata* (Rubiaceae). **New Phytologist**, Lancaster, v.156, n.3, p.437-444, 2002.
- COCKER, K.M.; EVANS, D.E.; HODSON, M.J. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants: Solution chemistry or an in plant mechanism. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.104, n.4, p.608-614, 1998.
- DEREN, C.W.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; MARTIN, F.G. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. **Crop Science**, Madson, v.34, n.3, p.733-737, 1994.
- EPSTEIN, E.; Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v.50, p.641-664, 1999.
- EPSTEIN, E.; BLOMM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2ª ed. Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.
- EPSTEIN, E. Silicon in plants: facts vs concepts. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Netherlands: Elsevier Science, 2001. p.1-15.
- FALLAH, A. Silicon effect on lodging parameters of rice plants under hydroponic culture. **International Journal of AgriScience**, Germany, v.2, n.7, p. 630-634, 2012.

FREITAS, L.B.; COELHO, E.M.; MAIA, S.C.M.; SILVA, T.R.B. Adubação foliar com silício na cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v.58, n.2, p.262-267, 2011.

FREITAS, L.B.; FERNANDES, D.M.; MAIA, S.C.M. Interação silício e alumínio em plantas de arroz de terras altas cultivadas em solo aluminico. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.36, n.2, p.507-516, 2012.

FURLANI, P.R.; FURLANI, A.M. **Composição de pH de solução nutritiva para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1988. p.21-26. (Boletim técnico, 121).

GODOY, L.J.G.; SANTOS, T.S.; VILLAS BÔAS, R.L.; LEITE JUNIOR, J.B. Índice relativo de clorofila e o estado nutricional em nitrogênio durante o ciclo do cafeeiro fertirrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.1, p.217-226, 2008.

HODSON, M.J.; EVANS, D.E. Aluminum/Silicon interactions in higher plants. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v.46, n.2, p.161-171, 1995.

HODSON, M.J.; SANGSTER, A.G. Aluminum/Silicon interactions in conifers. **Journal of Inorganic Biochemistry**, Chicago, v.76, n.2, p.89-98, 1999.

JANSEN, S.; WATANABE, T.; DESSEIN, S.; SMETS, E.; ROBBRECHT, E. A comparative study of metal levels in leaves of some Alaccumulating Rubiaceae. **Annals of Botany**, Oxford, v.91, n.6, p.657-663, 2003.

KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v.46, p.237-260, 1995.

KORNDORFER, G.H. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.356-374.

LUX, A.; LUXOVÁ, M.; HATTORI, T.; INANAGA, S.; SUGIMOTO, Y. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. **Plant Physiology**, Washington, DC, v.115, n.1, p.87-92, 2002.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319p.

MA, J.F. Role of silicon in enhancing the resistanc of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science & Plant Nutrition**, Malden, v.50, n.1, p.11-18, 2004.

MA, J.F.; SASAKI, M.; MATSUMOTO, H. Al-induced inhibition of root elongation in corn, *Zea mays* L. is overcome by Si addition. **Plant Soil**, The Hague, v.188, n.2, p.171-176, 1997.

MA, J.F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier Science, 2002. 274p.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v.11, n.8, p.392-397, 2006.

MAUAD, M.; FILHO, H.G.; CRUSCIOL, C.A.C.; CORRÊA, J.C. Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.5, p.867-873, 2003.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 2ª ed. Bern: International Potash Institute, 1979. 593p.

OLIVEIRA, L.A.; KORNDORFER, G.H.; PEREIRA, A.C. Acumulação de silício em arroz em diferentes condições de pH da rizosfera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.685-690, 2007.

PAN, Y.; HOM, J.; JENKINS, J.; BIRDESEY, R. Importance of foliar nitrogen concentration to predict forest productivity in the mid-Atlantic region. **Forest Science**, Bethesda, v.50, n.3, p.279-289, 2004.

PEREIRA, H.S.; BARBOSA, N.C.; CARNEIRO, M.A.C.; KORNDÖRFER, G.H. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v.42, n.2, p.239-247, 2007.

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.

SILVA, O.N.; LOBATO, A.K.S.; ÁVILA, F.W.; COSTA, R.C.L.; OLIVEIRA NETO, C.F.; SANTOS FILHO, B.G.; MARTINS FILHO, A.P.; LEMOS, R.P.; PINHO, J.M.; MEDEIROS, M.B.C.L.; CARDOSO, M.S.; ANDRADE, I.P. Silicon-induced increase in chlorophyll is modulated by the leaf water potential in two water-deficient tomato cultivars. **Plant Soil Environment**, Praga, v.58, n.11, p.481-486, 2012.

SILVEIRA, P.M.; BRAZ, A.J.B.P.; DIDONET, A.D. Uso do clorofilômetro como indicador da necessidade de adubação nitrogenada no feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.9, p.1083-1087, 2003.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 991p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TAMAI, K.; MA, J.F. Reexamination of silicon effects on rice growth and production under field conditions using a low silicon mutant. **Plant and Soil**, The Hague, v.307, n.1-2, p.21-27, 2008.

VIEIRA, S. **Estatística experimental**. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 1999. 185p.

WALLACE, A. Relationships among nitrogen, silicon, and heavy metal uptake by plants. **Soil Science**, Philadelphia, v.147, n.6, p.457-460, 1989.

WALLACE, A.; ROMNEY, E.A.; MUELLER, R.T. Nitrogen/silicon interaction in plants grown in desert soil with nitrogen deficiency. **Agronomy Journal**, Madison, v.68, n.3, p.529-530, 1976.

WANG, Y.X.; STASS, A.; HORST, W.J. Apoplastic binding of Aluminum is involved in Silicon-induced amelioration of Aluminum toxicity in maize. **Plant Physiology**, Washington, DC, v.136, n.3, p.3762-3770, 2004.

WANG, J.; RAMAN, H.; ZHANG, G.; MENDHAM, N.; ZHOU, M. Aluminum tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.): physiological mechanisms, genetics and screening methods. **Journal of Zhejiang University Science B**, Zhejiang, v.7, n.10, p.769-787, 2006.

Recebido para publicação em: 14/10/2013

Aceito para publicação em: 10/11/2013