

**Crescimento e Produção
do Trigo e da Aveia Branca
Suplementados com Silício**



ISSN 1679-0456

Julho, 2007

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agropecuária Oeste
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 41

Crescimento e Produção do Trigo e da Aveia Branca Suplementados com Silício

Oscar Fontão de Lima Filho
Siu Mui Tsai

Dourados, MS
2007

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Agropecuária Oeste

BR 163, km 253,6 -
Trecho Dourados-Caarapó
Caixa Postal 661
79804-970 Dourados, MS
Fone: (67) 3425-5122
Fax: (67) 3425-0811
www.cpao.embrapa.br
E-mail: sac@cpao.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *Carlos Hissao Kurihara*

Secretário-Executivo: *Claudio Lazzarotto*

Membros: *Augusto César Pereira Goulart, Carlos Lásaro Pereira de Melo, Euclides Maranhão, Fábio Martins Mercante, Guilherme Lafourcade Asmus, Hamilton Hisano, Júlio Cesar Salton e Sílvia Mara Belloni.*

Supervisão editorial, Revisão de texto e Editoração eletrônica:

Eliete do Nascimento Ferreira

Normalização bibliográfica: *Eli de Lourdes Vasconcelos*

Foto da capa: *Wilson Crivelari*

1ª edição

(2007): online

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei Nº 9.610).

CIP-Catálogo-na-Publicação.
Embrapa Agropecuária Oeste.

Lima Filho, Oscar Fontão de

Crescimento e produção do trigo e da aveia branca
suplementados com silício / Oscar Fontão de Lima Filho, Siu Mui
Tsai. — Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2007.

34 p. : il. color. ; 21 cm. — (Boletim de Pesquisa e
Desenvolvimento / Embrapa Agropecuária Oeste, ISSN 1679-0456 ;
41).

1. Trigo - Nutrição - Silício. 2. Aveia branca - Nutrição -
Silício. 3. Silício - Trigo - Aveia branca. I. Tsai, Siu Mui. II. Embrapa
Agropecuária Oeste. III. Título. IV. Série.

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Material e Métodos	13
Resultados e Discussão	14
Conclusões	27
Referências	29

Crescimento e Produção do Trigo e da Aveia Branca Suplementados com Silício

Oscar Fontão de Lima Filho¹
Siu Mui Tsai²

Resumo

Os estudos biológicos na área agrônômica já demonstraram os efeitos notáveis do silício no aumento do crescimento vegetal, na produção de alimentos e no combate a estresses causados em plantas por fatores físicos, climáticos e biológicos. O objetivo da pesquisa foi avaliar o efeito do silício no crescimento e produção de três cultivares de trigo (BR 18, BR 40 e IPR 85) e duas de aveia branca (URS 21 e UFRGS 17) em condições hidropônicas. As plantas foram cultivadas com níveis crescentes de silício: 0, 10, 25, 50 e 100 mg litro⁻¹. Os seguintes parâmetros de crescimento foram avaliados: altura de perfilhos, comprimento de espigas, número de sementes, massa da matéria seca de espigas, sementes, colmos + folhas e raízes por planta e massa individual de sementes. Foram realizadas análises de macro e micronutrientes na parte aérea das plantas, incluindo o silício. A suplementação de silício, em solução nutritiva, modificou positivamente o crescimento e a produção de grãos da aveia branca e, principalmente, do trigo. A absorção de silício pelas duas espécies foi diretamente proporcional às quantidades adicionadas ao substrato. Entretanto, houve diferenças

¹Eng. Agrôn., Dr., *Embrapa Agropecuária Oeste*, Caixa Postal 661, 79804-970 Dourados, MS. E-mail: oscar@cpao.embrapa.br

²Eng. Agrôn., Dra., Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Caixa Postal 96, 13400-970 Piracicaba, SP. E-mail: tsai@cena.usp.br

genotípicas marcantes quanto à absorção de silício entre as cultivares estudadas. Para a aveia branca, cultivares URS 21 e UFRGS 17, ocorreu aumento significativo na produção e no número de grãos de todos os tratamentos, que se equivaleram, em relação à testemunha. O trigo foi mais responsivo ao silício. As três cultivares de trigo apresentaram crescimento acentuado nos parâmetros matéria seca da parte aérea, espigas e grãos, aumento no número e na massa individual de grãos e no comprimento das espigas na cultivar IPR85. Foi constatado um efeito de diluição marcante nos teores de todos os macro e micronutrientes, analisados na parte aérea do trigo, por ocasião da colheita, exceção feita para o cobre na BR 18 e BR 40 e zinco na BR 18 e IPR 85.

Termos para indexação: Silicato, *Triticum aestivum*, *Avena sativa*, nutriente, absorção, efeito de diluição.

Growth and Production of Wheat and White Oat Supplemented with Silicon

Abstract

The biological studies in the agronomic area already demonstrated the notable effects of the silicon in the increase of the vegetable growth, in the production of foods and against plant stresses caused by physical, climatic and biological factors. The objective of the research was to evaluate the effect of the silicon in the growth and production of three cultivars of wheat (BR 18, BR 40, and IPR 85) and two cultivars of white oat (URS 21 and UFRGS 17) in hydroponic conditions. The plants were cultivated with increasing levels of silicon: 0, 10, 25, 50 and 100 mg liter⁻¹. The following growth parameters were evaluated: branch height, length of spikelet, number of seeds, mass of the dry matter of spikelet, seeds, stems + leaves and roots by plant and individual mass of seeds. Macro and micronutrients analyses were accomplished in the aerial part of the plants, including the silicon. The silicon supplementation, in nutrient solution, modified positively the growth and the production of grains of the white oat and, mainly, of the wheat. The silicon absorption for the two species was directly proportional to the amounts added to the substrate. However, there were significant differences genotypic in relation to the silicon uptake among cultivars studied. For the white oats, cultivar URS 21 and UFRGS 17, occurred significant increase in the production and in the number of grains for all treatments, that were equivalent to control. The wheat was more responsive to the silicon. The three cultivars, BR 18, BR 40 and IPR 85, showed a great growth in the parameters dry matter of the shoots and grains, increase in the

number and individual mass of grains and in the length of the spikelet in IPR85. An effect of dilution was verified in the content of all the macro and micronutrients, analyzed in the shoots of the wheat at harvest, except for the copper in BR 18 and BR 40 and zinc in BR 18 and IPR 85.

Index Terms: Silicon, *Triticum aestivum*, *Avena sativa*, nutrient, uptake, dilution effect.

Introdução

A palavra silício provém do latim *silix*, rocha constituída de sílica (dióxido de silício) amorfa hidratada e sílica microcristalina, a qual era utilizada, pela sua dureza, na confecção de utensílios e armas na Era Pré-Metálica ou Paleolítica.

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

O silício ocorre na solução do solo principalmente como ácido monossilícico (H_4SiO_4), com uma concentração variando de 0,1 a 0,6 mM, sendo absorvido pelas plantas nessa forma em quantidades bastante variáveis. Valores entre 0,1% e 10% são os mais usuais, embora ocorram percentuais tanto menores como maiores (Epstein & Bloom, 2006).

Estudos de ressonância magnética em trigo com o ^{29}Si indicam a existência de somente duas espécies contendo silício no exsudato do xilema. Estas espécies são os ácidos mono e dissilícico, numa proporção aproximada de 7 : 1. Também não há evidências de complexos organossilicatados (Casey et al., 2004).

Quantidades apreciáveis de silício podem ser encontradas nos vacúolos como estruturas cristalizadas, em precipitados no citoplasma e sobre o tonoplasto, tendo quase sempre como um produto final a sílica gel. O fato do trigo concentrar silício dentro da célula, no xilema na sua forma solúvel e a sua absorção ser muito mais rápida do que a da água, mostra que existe um mecanismo ativo de transporte, através das membranas das células

radiculares, dependente de energia (Okuda & Takahashi, 1962; Ma et al., 2001; Neumann & Figueiredo, 2002; Casey et al., 2004). A absorção de silício, nesse caso, está sob controle metabólico, sendo diminuído drasticamente por dinitrofenol (DNP) e cianeto de potássio (KCN) (Rains et al., 2006). A absorção e acumulação de silício na parte aérea do trigo é determinada, também, pela transpiração, crescimento (Duda et al, 2001) e disponibilidade do elemento no substrato. Aumento de temperatura aumenta o teor de silício nos tecidos do trigo (Su et al., 2002), já que aumenta a transpiração. A silicificação nas gramíneas ocorre nas raízes e na parte aérea, incluindo folhas, colmos e, mais intensamente, nas inflorescências. Os depósitos de silício ocorrem nos tecidos estruturais, vasculares, de armazenamento e na epiderme, como constatado em plântulas de trigo. A silicificação das paredes das células da endoderme das raízes de trigo ocorrem de maneira bastante rápida. Uma vez silicificados os sítios da endoderme radicular, a maior parte do silício é transportado para a parte aérea da planta (Sangster et al., 2001).

Ma et al. (2006) identificaram um gene que controla a acumulação de silício em arroz. O gene *Lsi 1*, codifica uma proteína da família das aquaporinas, localizada na membrana plasmática de células radiculares. Esta pesquisa abre a possibilidade de que plantas que absorvem pouco silício, possam ser modificadas geneticamente para terem a capacidade de absorver quantidades elevadas de silício, tornando-se mais resistentes a estresses múltiplos. Além disso, pode haver uma melhoria na qualidade nutricional humana devido ao aumento na acumulação de silício nos alimentos.

Pêlos radiculares, que são formados a partir de células epidérmicas, não contribuem para a absorção do silício, ao contrário do que ocorre com as raízes laterais. Este fato pode estar relacionado à falta de um sistema transportador de silício nestas estruturas (Ma et al., 2001b).

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

("cavalinha" ou "rabo-de-cavalo"), apesar de ser um constituinte majoritário dos vegetais (Chen & Lewin, 1969; Epstein, 1994; Marschner, 1995).

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

Exley (1998) define a essencialidade de um elemento quando a diminuição da resistência da planta a qualquer fator estressante, seja biótico ou abiótico, ocorre quando a concentração do elemento está abaixo de um limite crítico. Epstein & Bloom (2006) apresentaram um novo critério de essencialidade. De acordo com os autores um elemento é essencial se preenche pelo menos um dos critérios: "(1) O elemento é parte de uma molécula que é um componente intrínseco da estrutura ou do metabolismo da planta; (2) A planta pode ser tão severamente privada do elemento que exhibe anormalidades em seu crescimento, desenvolvimento ou reprodução, isto é, seu desempenho em comparação com plantas menos privadas." O silício se enquadra nas definições acima, já que a sua carência pode resultar em diminuição da capacidade biológica da planta em resistir às condições adversas do meio ambiente (Rafi et al., 1997).

Estudos científicos têm demonstrado aumentos significativos na taxa fotossintética, melhoria da arquitetura foliar e de outros processos no metabolismo vegetal, tendo como resultado final um aumento e maior

qualidade na produção. O silício tem um papel importante nas relações planta-ambiente, pois pode dar às culturas condições para suportar adversidades climáticas, edáficas e biológicas.

A utilização do silício na agricultura torna-se particularmente interessante quando o consideramos um anti-estressante natural. Estresses causados por temperaturas extremas, veranicos, metais pesados ou tóxicos, por exemplo, podem ter seus efeitos reduzidos com o uso do silício. A fertilização com silício pode, também, aumentar a resistência a várias doenças fúngicas bem como para algumas pragas (Adatia & Besford, 1986; Takahashi, 1995; Savant et al., 1997). No caso das doenças, inúmeros trabalhos mostram que o aumento da resistência da planta ao patógeno pode ser devido a uma alteração das respostas da planta ao ataque do parasita, aumentando a síntese de toxinas (fitoalexinas), que podem agir como substâncias inibidoras ou repelentes e a formação de barreiras mecânicas (Marschner, 1995).

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

Em Mato Grosso do Sul, a segunda safra ou safrinha, semeada após as culturas de verão, pode ser fonte de renda complementar para o produtor rural. A diversificação de culturas também é necessária para a preservação do meio ambiente. Ela contribui para o aumento de produtividade das culturas e reduz a vulnerabilidade da produção face às adversidades climáticas e econômicas. O trigo e a aveia são culturas importantes para a produção de grãos destinadas à alimentação humana e/ou animal. Representam importante alternativa para o período outono-inverno, dentro dos Sistemas de Produção de Mato Grosso do Sul, principalmente quando conduzida no plantio direto em sucessão à soja.

Essas duas espécies caracterizam-se por serem plantas acumuladoras de silício, absorvendo quantidades apreciáveis do elemento quando disponível no substrato. Considerando-se que as pesquisas têm demonstrado o envolvimento do silício em vários aspectos estruturais, fisiológicos e bioquímicos da vida das plantas, objetivou-se, neste trabalho, avaliar o efeito do silício no crescimento e produção de três cultivares de trigo e duas de aveia branca em condições hidropônicas.

Material e Métodos

Sementes das cultivares de trigo (*Triticum aestivum* L.) BR 18, BR 40 e IPR 85 e de aveia branca (*Avena sativa* L.) UFRGS 17 e URS 21 foram germinadas em vermiculita e transplantadas para vasos plásticos com capacidade para dois litros de solução nutritiva de Johnson, com metade da força iônica total (Johnson et al, 1957), pH inicial corrigido para 6,0 e arejamento constante, em casa-de-vegetação no CENA/USP, Piracicaba, SP. As soluções foram trocadas a cada dez dias e a reposição de água deionizada foi diária.

Os tratamentos constaram de cinco doses de silício na forma de metassilicato de sódio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$): 0, 10, 25, 50 e 100 mg litro^{-1} . O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com três repetições e duas plantas por parcela. Ambas as espécies foram colhidas ao final do ciclo.

Os seguintes parâmetros de crescimento foram avaliados: altura de perfilhos (cm), comprimento de espigas (cm), número de sementes, massa da matéria seca de espigas (cm), sementes (g), colmos + folhas (g) e raízes (g) por planta e massa individual de sementes (mg). O preparo das amostras e as análises químicas de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) na parte aérea foram realizados de acordo com metodologia descrita em Malavolta et al. (1997), enquanto as análises de silício foram feitas de acordo com Korndörfer et al. (2004). Foram realizadas análises de variância e de regressão dos resultados obtidos.

Resultados e Discussão

Teor de silício

As três cultivares de trigo e as duas de aveia absorveram de maneira exponencial o silício adicionado à solução nutritiva e disponibilizado até um patamar de $100 \text{ mg litro}^{-1}$. Dentre as cultivares de trigo, a IPR 85 absorveu e acumulou quantidades mais elevadas do nutriente. Em relação a esta, a cultivar BR 18 acumulou entre 75% e 80% nos diversos tratamentos, com exceção da testemunha, ao passo que a BR 40, mais susceptível a doenças, absorveu e translocou para a parte aérea quantidades menores que as outras cultivares estudadas, alcançando níveis entre 55% e 65% da IPR 85 (Fig. 1).

A aveia também teve um comportamento exponencial em relação à absorção de silício. A URS 21 apresentou valores 20 a 25% mais elevados de silício na parte aérea em relação à UFRGS 17 (Fig. 1). A alta variabilidade genética na capacidade de absorção e translocação de silício entre as cultivares, tanto do trigo como da aveia, é uma característica do comportamento do silício nas diversas espécies vegetais (Lanning, 1960; Nable et al., 1990; Deren et al., 1992; Winslow, 1992). A concentração de silício da parte aérea entre as plantas varia entre 1 e 100 g kg^{-1} de matéria seca, por causa das diferentes capacidades que as raízes têm em absorver o elemento (Takahashi et al., 1990; Epstein, 1994).

De modo semelhante ao observado neste trabalho, Guo et al. (2005) verificaram que a concentração de silício na parte aérea e nas raízes de arroz aumentou proporcionalmente em relação às quantidades adicionadas na solução nutritiva. Observa-se que as duas gramíneas, trigo e aveia, têm alta capacidade de absorção de silício, indicando a possibilidade de absorverem quantidades mais elevadas, caso houvesse um incremento na disponibilidade do elemento no substrato. Os valores obtidos referem-se aos teores de silício na parte aérea vegetativa (folhas + colmos), já que a análise de silício apenas nas folhas indicariam níveis mais elevados. Considerando-se o aspecto nutricional da planta, o silício é o único elemento que não causa injúrias às plantas quando acumulado em excesso, devido às suas propriedades de não dissociação em pH fisiológico e à polimerização (Ma et al., 2001a).

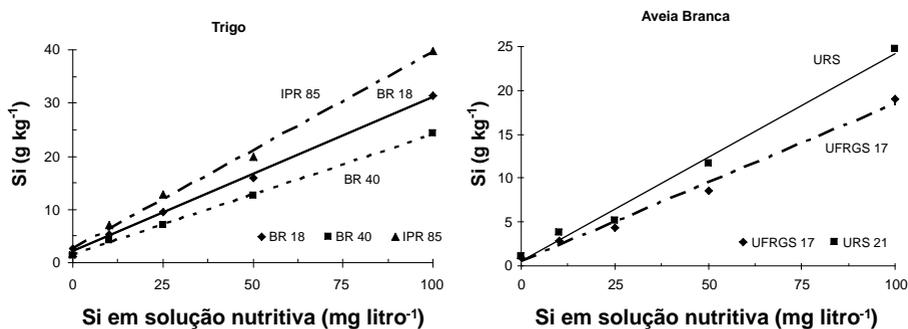


Fig. 1. Teor de silício na parte aérea de cultivares de trigo e aveia branca submetidas a níveis crescentes do elemento em condições hidropônicas. Trigo - BR 18: $y = 0,3684x + 2,608$, $R^2 = 0,99^{**}$; BR 40: $y = 0,2879x + 2,2677$, $R^2 = 0,99^{**}$; IPR 85: $y = 0,2258x + 1,5248$, $R^2 = 0,99^{**}$. Aveia - UFRGS 17: $y = 0,1798x + 0,4875$, $R^2 = 0,99^{**}$; URS 21: $y = 0,2355x + 0,5864$, $R^2 = 0,99^{**}$.

Crescimento e produção

O efeito do silício na produção de matéria seca vegetativa da parte aérea e das raízes do trigo, além da altura, foi significativo, principalmente na parte aérea da cultivar BR 40 (Fig. 2 e 3). O mesmo não ocorreu com a aveia, onde a adição de silício ao substrato não influenciou a altura nem o crescimento vegetativo da parte aérea ou das raízes. Por outro lado, o silício teve um efeito marcante no desenvolvimento reprodutivo da aveia branca, avaliado por meio da produção de grãos por planta (número e massa) e massa individual das sementes, em ambas as espécies, mas de modo mais marcante no trigo (Fig. 4 e 5). Nesta gramínea, o aumento na produção de grãos, em relação à testemunha, chegou a 43%, 100% e 60%, respectivamente nas cultivares BR 18, BR 40 e IPR 85. O comprimento médio das espigas da cultivar IPR 85 também apresentou aumento significativo com o fornecimento de silício. Apesar do menor potencial de absorção do silício pela cultivar BR 40, o aumento na produção de grãos foi maior do que nas outras duas cultivares. Isto se deveu, provavelmente, à incidência decrescente de oídio, em função do aumento de silício adicionado à solução nutritiva e, conseqüentemente, na parte aérea da planta. O aumento na resistência dessa cultivar ao oídio, devido ao fornecimento de silício, foi marcante. Isto refletiu no maior incremento na produção de grãos em função dos tratamentos crescentes de silício.

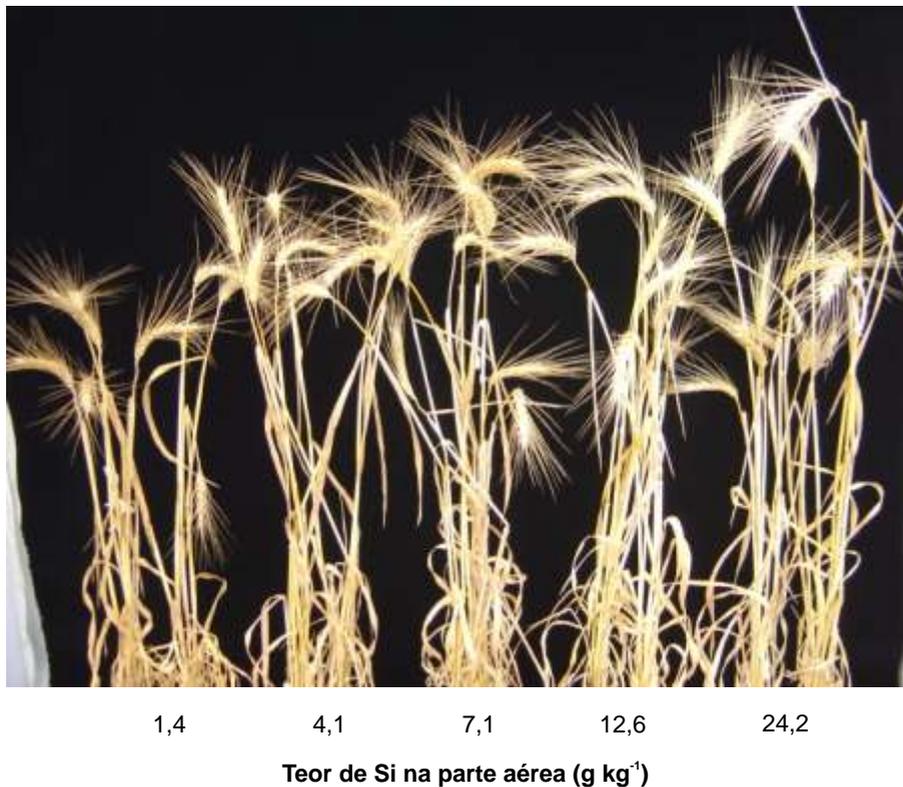


Fig. 2. Trigo em condições hidropônicas, cultivar BR 40, com níveis crescentes de silício na parte aérea. Tratamentos: 0, 10, 25, 50 e 100 mg litro⁻¹ de silício em solução nutritiva.

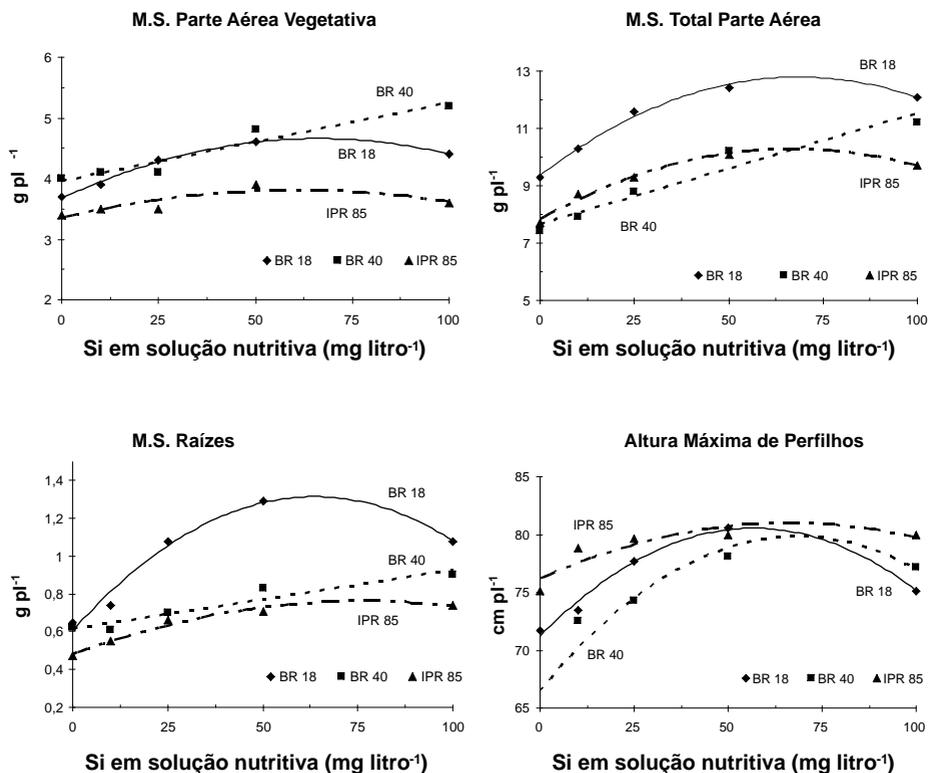


Fig. 3. Crescimento vegetativo das cultivares de trigo BR 18, BR 40 e IPR 85 submetidas a níveis crescentes de silício em condições hidropônicas.

M.S. Parte Aérea Vegetativa - BR 18: $y = -0,0002x^2 + 0,0298x + 3,6735$, $R^2 = 0,99^{**}$; BR 40: $y = 0,0129x + 3,9639$, $R^2 = 0,93^{**}$; IPR 85: $y = -0,0001x^2 + 0,015x + 3,3519$, $R^2 = 0,75^{**}$. M.S. Total Parte Aérea - BR 18: $y = -0,0007x^2 + 0,0997x + 9,3725$, $R^2 = 0,991$; BR 40: $y = 0,0385x + 7,6763$, $R^2 = 0,94^{**}$; IPR 85: $y = -0,0006x^2 + 0,0742x + 7,8245$, $R^2 = 0,98^{**}$. Raízes - BR 18: $y = -0,0002x^2 + 0,0223x + 0,6073$, $R^2 = 0,97^{**}$; BR 40: $y = 0,0031x + 0,6179$, $R^2 = 0,92^{**}$; IPR 85: $y = -5E-05x^2 + 0,0074x + 0,48$, $R^2 = 0,98^{**}$. Altura Máxima dos Perfilhos - BR 40: $y = -0,0005x^2 + 0,0694x + 5,6496$, $R^2 = 0,99^{**}$; IPR 85: $y = -0,0004x^2 + 0,0534x + 4,6075$, $R^2 = 0,98^{**}$; BR 18: $y = -0,0003x^2 + 0,0568x + 3,3656$, $R^2 = 0,99^{**}$.

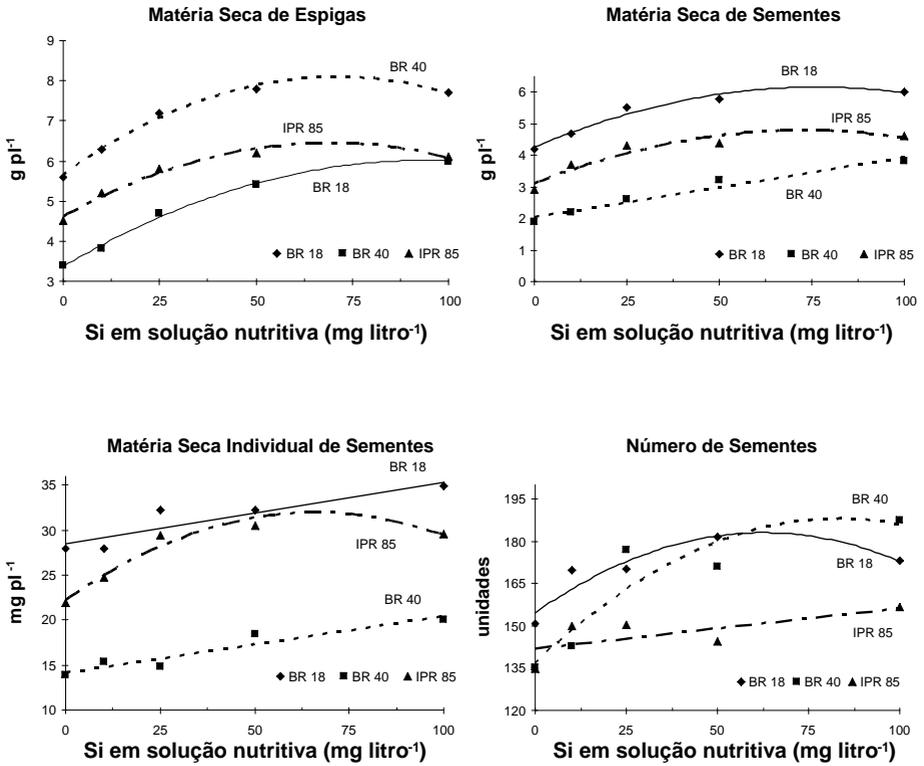


Fig. 4. Crescimento reprodutivo das cultivares de trigo BR 18, BR 40 e IPR 85 submetidas a níveis crescentes de silício em condições hidropônicas.

Matéria Seca de Espigas - BR 40: $y = -0,0005x^2 + 0,0694x + 5,6496$, $R^2 = 0,99^{**}$; IPR 85: $y = -0,0004x^2 + 0,0534x + 4,6075$, $R^2 = 0,98^{**}$; BR 18: $y = -0,0003x^2 + 0,0568x + 3,3656$, $R^2 = 0,99^{**}$.
 Matéria Seca de Sementes - BR 18: $y = -0,0003x^2 + 0,0501x + 4,2563$, $R^2 = 0,97^{**}$; IPR 85: $y = -0,0003x^2 + 0,0466x + 3,1038$, $R^2 = 0,90^{**}$; BR 40: $y = 0,0188x + 2,0435$, $R^2 = 0,96^{**}$.
 Matéria Seca Individual de Sementes - BR 18: $y = 0,0688x + 28,515$, $R^2 = 0,84^{**}$; BR 40: $y = 0,062x + 14,206$, $R^2 = 0,90^{**}$; IPR 85: $y = -0,0022x^2 + 0,2947x + 22,216$, $R^2 = 0,95^{**}$.
 Número de Sementes - BR 18: $y = -0,0073x^2 + 0,9098x + 154,54$, $R^2 = 0,86^{**}$; BR 40: $y = -0,0074x^2 + 1,2357x + 136,51$, $R^2 = 0,85^{**}$; IPR 85: $y = 0,1429x + 141,93$, $R^2 = 0,47$ ns.

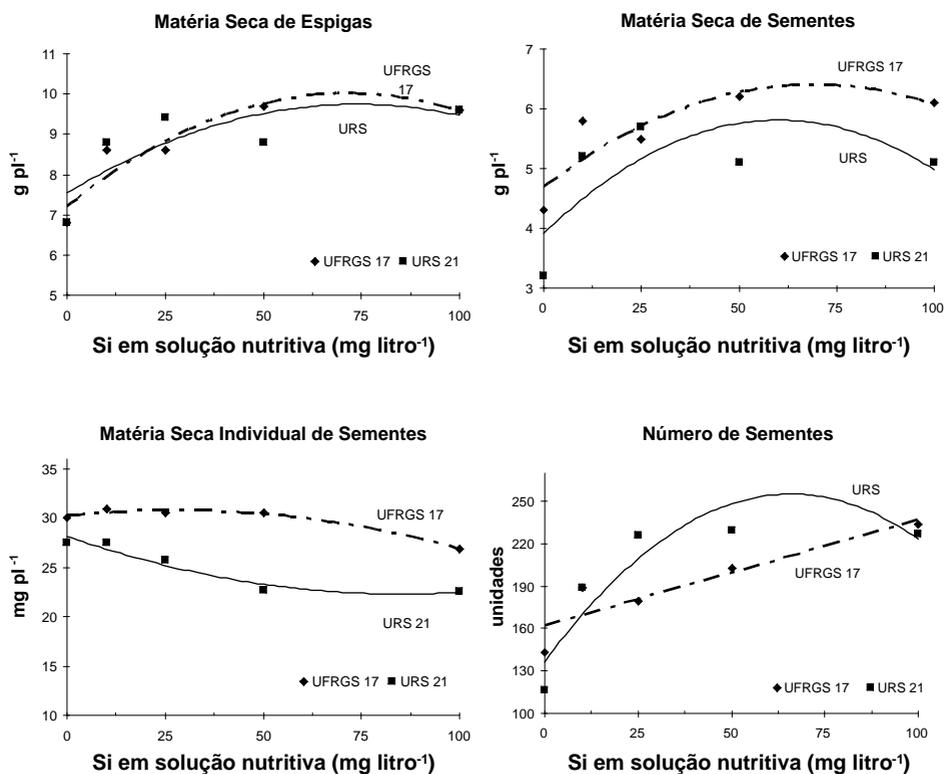


Fig. 5. Crescimento reprodutivo das cultivares de aveia UFRGS 17 e URS 21 submetidas a níveis crescentes de silício em condições hidropônicas.

Matéria Seca de Espigas - UFRGS 17: $y = -0,0006x^2 + 0,0792x + 7,1955$, $R^2 = 0,88^{**}$; URS 21: $y = -0,0004x^2 + 0,0599x + 7,5384$, $R^2 = 0,60^{**}$. Matéria Seca de Sementes - UFRGS 17: $y = -0,0004x^2 + 0,0497x + 4,6896$, $R^2 = 0,73^{**}$; URS 21: $y = -0,0005x^2 + 0,0632x + 3,9117$, $R^2 = 0,53^{**}$. Matéria Seca Individual de Sementes - UFRGS 17: $y = -0,0008x^2 + 0,0417x + 30,245$, $R^2 = 0,98^{***}$; URS 21: $y = 0,0008x^2 - 0,1375x + 28,147$, $R^2 = 0,94^{**}$. Número de Sementes - UFRGS 17: $y = 0,7529x + 161,78$, $R^2 = 0,83^{***}$; URS 21: $y = -0,0274x^2 + 3,6083x + 136,4$, $R^2 = 0,85^{**}$.

Algumas plantas de trigo do tratamento testemunha, ao final do ensaio, não apresentavam rigidez dos colmos suficiente para manterem-se eretas, demonstrando o papel fundamental do silício na manutenção estrutural e da arquitetura da planta (Fig. 6). A parede celular tem um papel determinante nas propriedades físicas das plantas. Cereais, como arroz e trigo, são particularmente sensíveis aos níveis baixos de silício no substrato. O silício minimiza ou impede o acamamento destas e de outras culturas. Este efeito é atribuído à deposição de silício na forma de sílica amorfa sólida ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) nas paredes celulares, principalmente da epiderme, aumentando a força mecânica dos colmos (Epstein, 1999).



Foto: Oscar Fontão de Lima Filho

Fig. 6. Plantas de trigo sem (0 mg litro^{-1}) e com suplementação ($100 \text{ mg litro}^{-1}$) de silício na solução nutritiva.

No trigo ocorreu, também, aumento no número de grãos por planta e no peso individual destes. O aumento máximo para o número de grãos foi de 21%, 38% e 16% para as cultivares BR 18, BR 40 e IPR 85, respectivamente. O peso individual médio das sementes teve um incremento de até 25%, 44% e 35% para as cultivares BR 18, BR 40 e IPR 85, respectivamente (Fig. 5). No caso das aveias, de modo geral, a testemunha apresentou produção e número de

grãos significativamente mais baixos em relação às plantas com suplementação de silício. Ao contrário do trigo, porém, houve uma tendência de diminuição no tamanho das sementes com o aumento de silício nas plantas (Fig. 5). O fornecimento de silício na cultivar de trigo IPR 85 também propiciou aumento significativo no comprimento médio das espigas (Fig. 7).

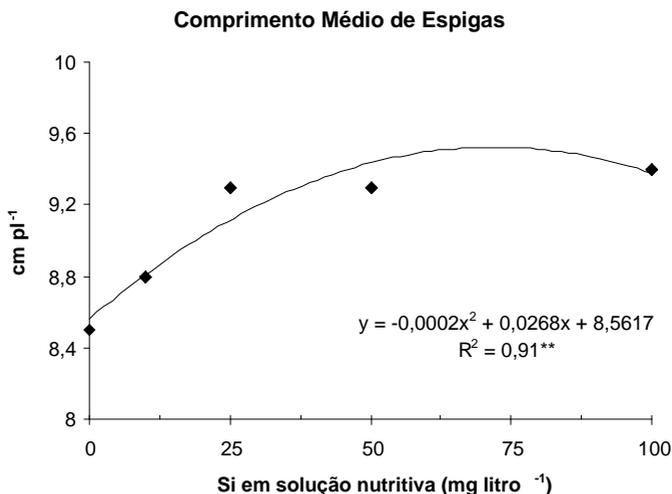


Fig. 7. Comprimento médio de espigas de trigo da cultivar IPR 85 submetida a níveis crescentes de silício em condições hidropônicas.

O aumento na acumulação da matéria seca pode ser devido a inúmeros fatores: aumento na fotossíntese, diminuição na respiração, aumento na translocação de fotoassimilados para o local de incorporação, maior potencial de turgor, menor incidência de doenças e pragas, menor taxa de senescência, melhor balanço hormonal e menor ocorrência de temperaturas relacionadas ao decréscimo no potencial de produção (Jarrell & Beverly, 1981).

A matéria seca produzida pelas cultivares de trigo e aveia branca, fruto das atividades essenciais da fotossíntese e do metabolismo protéico, referem-se à produção biológica total, que inclui folhas, colmos, espigas e raízes. Para a agricultura é importante a produção de biomassa do ponto de vista econômico

e comercial. Para as plantas em estudo pode-se relacionar a biomassa dos grãos com a biomassa total ou biológica, obtendo-se o índice de colheita (IC) (Huhn, 1990). O IC, tanto do trigo como da aveia branca, aumentou com o incremento de silício na solução nutritiva, conseqüentemente nas plantas. Para o trigo os IC aumentaram de 45,2% para 49,6% (BR 18), 25,7% para 33,9% (BR 40) e de 37,7% para 47,4% (IPR 85). No caso da aveia branca, as variações também foram positivas, variando de 19,5% para 25,8% (URS 21) e de 16,1% para 25,7% (UFRGS 17). Enquanto no trigo os valores máximos do IC foram obtidos no tratamento mais elevado, na aveia branca os valores mais altos do IC foram obtidos nos tratamentos com 10 mg litro^{-1} e 25 mg litro^{-1} para UFRGS 17 e URS 21, respectivamente. O aumento do IC, em função da suplementação de silício, é devido à maior retenção e remobilização de fotoassimilados para os grãos. Plantas de trigo que remobilizam com eficiência fotoassimilados para os grãos durante a maturação, podem reter mais fotoassimilados e fornecer IC mais elevados (Gent & Kiyomoto, 1989).

Em gramíneas acumuladoras, o silício pode promover aumentos nos atributos de crescimento, na atividade fotossintética das folhas inferiores e na dureza de folhas e colmos (Singh et al., 2005b), como é o caso, por exemplo, do arroz e trigo. Experimentos de campo comprovam o efeito da aplicação de silicatos em parâmetros de crescimento e produção. Em cereais os trabalhos são mais numerosos em arroz. Singh et al. (2005a) estudaram doses e épocas de aplicação de silício em duas colheitas consecutivas. A adubação silicatada promoveu aumento na altura, produção de matéria seca, número de panículas por metro quadrado e produtividade. Aplicação de silício em trigo cultivado em vasos com solo, aumentou a altura, área foliar e matéria seca (Gong et al., 2003). Adição de silício em solução nutritiva aumentou a matéria seca da parte aérea de plântulas de arroz, mas não das raízes (Guo et al., 2005). Em condições de estresse salino, a aplicação de silício aumentou a porcentagem de germinação de sementes e a biomassa de trigo (Matichenkov et al., 2005). Mas o efeito benéfico deste elemento na germinação de sementes não se restringe a gramíneas, como observado em melão, cultivado sem estresse, no qual foi marcado pelo aumento nas atividades da protease, lipase e vigor das sementes (Li & Ma, 2002).

A estrutura da parte aérea de plantas pode melhorar com a aplicação de silício, permitindo maior aproveitamento da radiação solar, portanto

favorecendo a fotossíntese e a assimilação de carbono. Com isso, há um maior estímulo no crescimento de meristemas, por meio da adição de material na parede celular, no citoplasma e nos vários tipos de organelas celulares (Galston, 1968). Em arroz adubado com silício a distância entre a posição desejável e a posição real da primeira folha foi menor no tratamento com silício, além da intensidade luminosa relativa ser maior, independentemente da altura da planta (Ando et al., 2002).

O silício induz mudanças nas propriedades da parede celular da célula vegetal. Estudos com trigo, arroz e outras poáceas mostram que um dos efeitos do silício na promoção do crescimento está relacionado ao aumento no tamanho das células epidérmicas, especialmente de regiões basais, sem afetar o número de células. Isto demonstra que o silício promove um dos três eventos pelos quais passa o crescimento e desenvolvimento celular, ou seja, o alongamento celular. Os outros dois eventos são a divisão e a diferenciação celular (Salisbury & Ross, 1992; Hossain et al., 2002b). A taxa de expansão da célula é determinada diretamente pelo potencial osmótico e pelas propriedades mecânicas da parede celular (Cosgrove, 1986). O silício diminui a espessura da parede das células na região basal das folhas, que por sua vez pode ocasionar um aumento na extensibilidade da parede celular, promovendo assim um crescimento geral da folha sob condições não estressantes (Hossain et al., 2002a).

Hattori et al. (2003) estudaram as mudanças induzidas pelo silício nas propriedades mecânicas das paredes celulares de células radiculares de sorgo. A deposição do silício no tecido endodérmico pode estar relacionada à proteção do cilindro vascular contra invasões de parasitas e recrudescimento das células em condições hídricas desfavoráveis. Nas zonas apicais e subapicais o silício aumentou a capacidade de extensão da parede celular, facilitando o crescimento, ao passo que na zona basal o silício diminuiu a extensibilidade da parede celular, evidenciando a proteção mecânica pelo enrijecimento das paredes celulares da endoderme e do cilindro vascular.

Melhoria na eficiência do uso da água é um dos efeitos que podem ocorrer com o aumento nos níveis de silício no solo. Em condições de estresse hídrico há fechamento dos estômatos, diminuindo a taxa fotossintética. Gramíneas acumuladoras apresentam uma acumulação de silício no espaço entre as

células da cutícula e da epiderme das folhas e da casca do grão, formando uma dupla camada cutícula-silício. Como a transpiração ocorre majoritariamente pelos estômatos e parcialmente pela cutícula, o silício atenua este estresse por meio da diminuição da transpiração (Yoshida et al., 1962; Ma, 2005).

Mesmo o trigo e a aveia sendo cultivadas em condições hidropônicas, a baixa umidade relativa do ar e altas temperaturas podem induzir estresse hídrico em determinadas horas do dia. Como visto anteriormente, o silício está associado ao alongamento celular, e este evento está intimamente associado à absorção de água e ao aumento do vacúolo. As células cúbicas produzidas nos meristemas de uma planta em crescimento tem vários vacúolos. O aumento em tamanho, especialmente em comprimento, é devido principalmente à absorção e acumulação de água nestes vacúolos. Estes crescem e coalescem em um único central. Com o suprimento adequado de silício a absorção e a acumulação de água nos vacúolos é mais uniforme e constante (Galston, 1968).

O silício pode modificar o metabolismo do crescimento favoravelmente, acelerando a taxa respiratória, aumentando a taxa fotossintética, as atividades das raízes e da redutase de nitrato e diminuindo a taxa de transpiração, como foi constatado em plântulas de pepineiro por Li & Ma (2002). Mesmo não havendo modificação no crescimento vegetativo, o crescimento reprodutivo pode ser afetado favoravelmente. A suplementação de silicato de sódio em melão cultivado hidroponicamente não aumentou o crescimento da parte aérea, porém aumentou a massa fresca das raízes e também a relação raízes : parte aérea. Nestas plantas a produção foi mais precoce em função da antecipação do florescimento e diminuição de frutos abortados. Houve aumento no teor de clorofila e redução na transpiração (Lu & Cao, 2001). Pesquisas mostram que o silício pode aumentar a absorção de nitrogênio induzindo, assim, aumento na massa vegetativa (Takahashi, 1995; Gu et al., 1999; Lima Filho et al., 2003).

No trigo, para as três cultivares, ocorreu um efeito de diluição para a maior parte dos nutrientes, analisados nos tecidos após a senescência da planta. Quando o trigo foi suprido com o silício, a taxa relativa de acumulação de matéria seca aumentou mais rapidamente do que a taxa de acumulação dos

nutrientes, resultando em uma concentração final mais baixa nas plantas tratadas, inclusive com diminuição da quantidade total. Exceção feita para o cobre na BR 18 e BR 40 e zinco na BR 18 e IPR 85. Não ocorreu o mesmo com a aveia branca, já que não houve alteração no crescimento vegetativo da parte aérea (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Teor de macro e micronutrientes na parte aérea de três cultivares de trigo submetidas a níveis crescentes de silício em condições hidropônicas.

Tratamento Si mg L ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn	B
	----- g kg ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----					
BR 18											
0	12,6	2,5	36,3	7,6	2,0	2,0	4,3	157,0	9,0	9,3	56,6
10	10,8	2,3	31,2	6,9	2,0	1,3	4,0	116,0	7,3	10,0	41,4
25	10,2	1,9	25,7	6,0	1,6	1,0	3,7	98,7	6,3	8,0	41,1
50	9,1	1,8	25,7	5,7	1,5	0,9	4,7	104,3	5,3	9,7	34,3
100	8,9	2,0	25,5	4,8	1,3	0,8	6,0	85,0	5,3	10,3	28,3
Correlação	0,77**	0,32ns	0,69**	0,79**	0,83**	0,71**	0,62*	0,70**	0,72**	0,27ns	0,65*
BR 40											
0	12,0	4,8	31,8	6,0	1,6	1,6	4,3	189,0	10,3	13,3	49,6
10	12,6	5,0	28,2	6,4	1,8	1,4	3,7	215,7	9,0	14,3	39,8
25	11,0	4,1	26,2	5,2	1,4	1,0	4,0	176,7	7,3	10,7	49,5
50	11,1	3,9	23,5	4,8	1,1	0,9	4,3	119,3	7,0	10,0	28,6
100	10,4	3,1	21,3	4,3	1,0	0,7	4,7	117,3	6,0	10,7	20,4
Correlação	0,53*	0,69**	0,87**	0,82**	0,83**	0,87**	0,52ns	0,75**	0,79**	0,56*	0,72**
IPR 85											
0	12,8	2,9	37,7	7,5	2,3	2,0	4,7	186,0	9,3	12,3	54,5
10	11,1	2,8	33,3	6,5	2,0	1,6	4,0	205,0	8,3	15,3	57,8
25	10,3	2,2	31,0	5,7	1,7	1,0	4,0	126,7	7,3	13,3	48,2
50	10,8	2,5	31,0	5,6	1,9	1,1	4,3	152,0	7,3	13,0	40,2
100	9,5	1,8	26,3	4,2	1,2	0,7	3,3	118,0	5,0	12,3	22,8
Correlação	0,73**	0,53*	0,80**	0,92**	0,86**	0,82**	0,61*	0,66**	0,85**	0,30ns	0,92**

Tabela 2. Teor de macro e micronutrientes na parte aérea de duas cultivares de aveia branca submetidas a níveis crescentes de silício em condições hidropônicas.

Tratamento Si mg L ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn	B
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
UFRGS 17											
0	10,6	2,7	22,8	5,7	1,5	0,9	3,0	151,0	5,7	9,0	26,5
10	8,6	2,4	20,5	5,6	1,3	0,8	3,7	222,7	5,0	11,3	24,0
25	7,1	2,4	20,8	5,5	1,2	0,6	3,3	182,0	5,0	11,0	28,7
50	7,3	2,4	18,3	4,0	1,0	0,4	3,7	173,0	5,0	9,3	26,3
100	8,1	2,6	19,3	5,4	1,4	0,6	1,0	164,7	3,7	11,3	25,8
Correlação	0,32ns	0,41ns	0,44ns	0,20ns	0,14ns	0,45ns	0,03ns	0,11ns	0,53*	0,16ns	0,00ns
URS 21											
0	11,1	3,2	26,7	7,9	2,0	1,0	2,3	140,0	5,0	11,0	28,9
10	9,7	3,0	22,7	6,5	1,6	0,8	2,3	123,0	4,3	12,0	31,0
25	8,4	2,8	21,7	7,1	1,6	0,9	3,0	156,0	4,7	10,3	23,4
50	8,7	3,0	20,3	5,9	1,4	0,7	2,3	118,7	4,3	12,0	25,4
100	8,8	3,0	19,3	4,6	1,3	0,8	2,0	288,0	3,7	10,3	20,1
Correlação	0,51ns	0,12ns	0,73**	0,78**	0,78**	0,33ns	0,23ns	1,62ns	0,65**	0,30ns	0,73**

Conclusões

A suplementação de silício, em condições de hidroponia, modificou positivamente o crescimento e a produção de grãos da aveia branca e, principalmente, do trigo.

A absorção de silício pelas duas espécies foi diretamente proporcional às quantidades adicionadas ao substrato. Entretanto, houve diferenças genotípicas marcantes quanto à absorção de silício entre as cultivares estudadas.

Para a aveia branca, cultivares URS 21 e UFRGS 17, ocorreu aumento significativo na produção e no número de grãos de todos os tratamentos, que se equivaleram, em relação à testemunha.

O trigo foi mais responsivo ao silício. As três cultivares, BR 18, BR 40 e IPR 85, apresentaram crescimento acentuado nos parâmetros matéria seca da parte aérea, espigas e grãos, aumento no número e na massa individual de grãos e no comprimento das espigas na cultivar IPR85.

Foi constatado um efeito de diluição marcante nos teores de todos os macro e micronutrientes, analisados na parte aérea do trigo, por ocasião da colheita, exceção feita para o cobre na BR 18 e BR 40 e zinco na BR 18 e IPR 85.

Referências

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

ANDO, H.; KAKUDA, K.; FUJII, H.; SUZUKI, K.; AJIKI, T. Growth and canopy structure of rice plants grown under field conditions as affected by Si application. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 48, n. 3, p. 429-432, July 2002.

ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 14, n. 2, p. 371-375, Apr. 1939.

CASEY, W. H.; KINRADE, S. D.; KNIGHT, C. T. G.; RAINS, D. W.; EPSTEIN, E. Aqueous silicate complexes in wheat, *Triticum aestivum* L. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 27, n. 1, p. 51-54, Jan. 2004.

CHEN, C. H.; LEWIN, J. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 47, p. 125-131, 1969.

COSGROVE, D. J. Biophysical control of plant cell growth. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 37, p. 377-405, June 1986.

DEREN, L. W.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Variable silicon content of rice cultivars grown on everglades histosols. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 15, n. 11, p. 2363-2368, Nov. 1992.

DUDA, R.; GUTSER, R.; SCHMIDHALTER, U. Characterizing site specific differences in water availability. In: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION COLLOQUIUM, 14., 2001, Hannover. **Plant nutrition: food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research.** Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. p. 390-391. (Developments in plant and soil sciences, 92). Editado por W. J. Horst et al.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 91, n. 1, p.11-17, Jan. 1994.

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

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas.** 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.

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

GALSTON, A. W. **The green plant.** New Jersey: Prentice-Hall, 1968. 118 p.

GENT, M. P. N.; KIYOMOTO, R. K. Assimilation and distribution of photosynthate in winter wheat cultivars differing in harvest index. **Crop Science**, Madison, v. 29, n. 1, p. 120-125, Jan./Feb. 1989.

GONG, H. J.; CHEN, K. M.; CHEN, G. C.; WANG, S. M.; ZHANG, C. L. Effects of silicon on growth of wheat under drought. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 5, p. 1055-1063, May 2003.

GU, Z. Q.; HUANG, C. X.; LU, J. H.; QIN, J.; HE, Z. Y. Techniques and efficacy of silicon fertiliser application in fluvo-aquic soils and paddy soils in rice-wheat rotation regions. **Jiangsu Agricultural Sciences**, v. 3, p. 50-52, 1999.

GUO, W.; HOU, Y. L.; WANG, S. G.; ZHU, Y. G. Effect of silicate on the growth and arsenate uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings in solution culture. **Plant and Soil**, The Hague, v. 272, n. 1/2, p. 173-181, May 2005.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; TANIMOTO, E.; LUX, A.; LUXOVA, M.; SUGIMOTO, Y. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. **Plant and Cell Physiology**, Tokyo, v. 44, n. 7, p. 743-749, July 2003.

HOSSAIN, M. T.; KOUICHI, S.; WAKABAYASHI, K.; FUJII, S.; YAMAMOTO, R.; HOSON, T. Silicon stimulates oat leaf growth by modifying cell wall properties. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 2., 2002, Tsuruoka. **Annals...** Tsuruoka: Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 2002a. p. 121-124.

HOSSAIN, M. T.; MORI, R.; SOGA, K.; WAKABAYASHI, K.; KAMISAKA, S.; FUJII, S.; YAMAMOTO, R.; HOSON, T. Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. **Journal of Plant Research**, Tokyo, v. 115, n. 1117, p. 23-27, Feb. 2002b.

HUHN, M. Comments on the calculation of mean harvest index. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 165, p. 86-93, 1990.

JARRELL, W. M.; BEVERLY, R. B. Dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 34, p. 197-224, 1981.

JOHNSON, C. M.; STOUT, P. R.; BROYER, T. C.; CARLTON, A. B. Comparative chlorine requirements of different plant species. **Plant and Soil**, The Hague, v. 8, n. 4, p. 337-353, May 1957.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício**: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: UFU, ICIAG, GPSi, 2004. 34 p. (UFU-ICIAG-GPSi. Boletim técnico, 2).

LANNING, F.C. Nature and distribution of silica in strawberry plants. **Journal of American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 76, p. 349-358, 1960.

LI, Q. F.; MA, C. C. Effect of available silicon in soil on cucumber seed germination and seedling growth metabolism. **Acta Horticulturae Sinica**, Wageningen, v. 29, n. 5, p. 433-437, 2002.

LIMA FILHO, O. F.; GROTHGE-LIMA, M. T.; TSAI, S. M. Efeito do silício na absorção de nitrogênio, fósforo e potássio em duas cultivares de soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Solo**: alicerce dos sistemas de produção. Botucatu: UNESP: SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

LU, G.; CAO, J. S. Effects of silicon on earliness and photosynthetic characteristics of melon. **Acta Horticulturae Sinica**, Wageningen, v. 28, n. 5, p. 421-424, 2001.

MA, J. F. Silicon requirement for rice. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. **Proceedings....** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005. p. 52-61.

MA, J. F.; GOTO, S.; TAMAI, K.; ICHII, M. Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 127, n. 4, p. 1773-1780, Apr. 2001a.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001b. p. 17-39. (Studies in plant science, 8).

MA, J. F.; TAMAI, K.; YAMAJI, N.; MITANI, N.; KONISHI, S.; KATSUHARA, M.; ISHIGURO, M.; MURATA, Y.; YANO, M. A silicon transporter in rice. **Nature**, London, v. 440, n. 7084, p. 688-691, Mar. 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Potafós, 1997. 319p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. New York: Academic Press, 1995. 887 p.

MATICHENKOV, V. V.; KOSOBROUKHOV, A. A.; SHABNOVA, N. I.; BOCHARNIKOVA, E. A. Plant response to silicon fertilizers under salt stress. **Agrokimiya**, Moscow, v. 10, p. 59-63, 2005.

NABLE, R. O.; LANCE, R. C. M.; CARTWRIGHT, B. Uptake of boron and silicon by barley genotypes with differing susceptibilities to boron toxicity. **Annals of Botany**, London, v. 66, n. 1, p. 83-90, July 1990.

NEUMANN, D.; FIGUEIREDO, C. de. A novel mechanism of silicon uptake. **Protoplasma**, New York, v. 220, n. 1/2, p. 59-67, Oct. 2002.

OKUDA, A.; TAKAHASHI, E. Studies on the physiological role of silicon in crop plants: 8. Some specific behaviors of rice plants in silicic acid uptake. **Journal of Science and Soil Manure**, Tokyo, v. 33, p. 217-221, 1962.

RAFI, M. M.; EPSTEIN, E.; FALK, R. H. Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 151, n. 4, p. 497-501, 1997.

RAINS, D. W.; EPSTEIN, E.; ZASOSKI, R. J.; ASLAM, M. Active silicon uptake by wheat. **Plant and Soil**, The Hague, v. 280, n. 1-2, p. 223-228, Feb. 2006.

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

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Plant physiology**. 4th ed. Belmont: Wadsworth, 1992. 682 p.

SANGSTER, A. G.; HODSON, J.; TUBB, H. J. Silicon deposition in higher plants. In: DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 85-113. (Studies in plant science, 8).

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

SINGH, A. K.; SINGH, R.; SINGH, K. Growth, yield and economics of rice (*Oryza sativa*) as influenced by level and time of silicon application. **Indian Journal of Agronomy**, New Delhi, v. 50, n. 3, p. 190-193, Jul. 2005a.

SINGH, K. K.; SINGH, K.; SINGH, R. S.; SINGH, R.; CHANDEL, R. S. Silicon nutrition in rice: a review. **Agricultural Reviews**, New Delhi, v. 26, n. 3, p. 223-228, 2005b.

SRIPANYAKORN, S.; JUGDAOHSINGH, R.; THOMPSON, R. P. H.; POWELL, J. J. Dietary silicon and bone health. **Nutrition Bulletin**, Oxford, v. 30, n. 3, p. 222-230, 2005.

SU, R. Z.; LIU, Z. M.; LI, J.; AI, J. Study on silica distribution of wheat straw surface. **Scientia Silvae Sinicae**, Beijing, v. 38, n. 6, p. 99-102, 2002.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.). **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. p. 420-433.

TAKAHASHI, E.; MA, J. F.; MIYAKE, Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, v. 2, p. 99-122, 1990.

WERNER, D. Silicate metabolism. In: WERNER, D. **The biology of diatoms**. Oxford: Blackwells Scientific, 1977. p. 110-149.

WERNER, D.; ROTH, R. Silica metabolism. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. **Encyclopedia of plant physiology: new series**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. v. 15B, p. 682-694.

WINSLOW, M. D. Silicon, disease resistance and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. **Crop Science**, Madison, v. 32, n. 5, p. 1208-1213, Sep./Oct. 1992.

YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Chemical forms, mobility and deposition of silicon in rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 8, n. 3, p. 15-21, 1962.



Agropecuária Oeste

Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

