

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**SILÍCIO NA TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO POR PLANTAS DE
ARROZ**

LUCAS BARBOSA DE FREITAS

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU-SP

Fevereiro de 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**SILÍCIO NA TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO POR PLANTAS DE
ARROZ**

LUCAS BARBOSA DE FREITAS

Orientador: Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E
DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA
- LAGEADO - BOTUCATU (SP)

F862s Freitas, Lucas Barbosa de, 1984-
Silício na tolerância ao alumínio por plantas
de arroz / Lucas Barbosa de Freitas. - Botucatu :
[s.n.], 2011
xi, 100 f. : il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu,
2011

Orientador: Dirceu Maximino Fernandes
Inclui bibliografia

1. Alumínio. 2. Nutrição de plantas. 3. *Oryza*
sativa L. 4. Silício na agricultura. I. Fernandes,
Dirceu Maximino. II. Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu).
Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

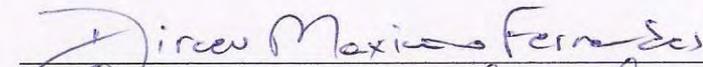
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: SILÍCIO NA TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO POR PLANTAS DE ARROZ

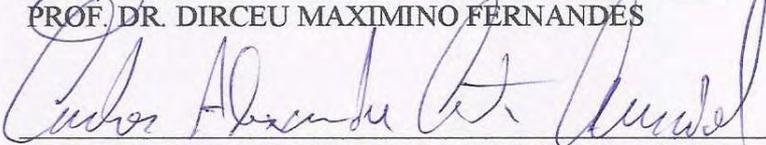
ALUNO: LUCAS BARBOSA DE FREITAS

ORIENTADOR: PROF. DR. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

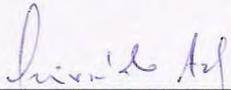
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES



PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL



PROF. DR. ORIVALDO ARF

Data da Realização: 24 de fevereiro de 2011.

Aos meus pais *Diorande* e *Glêide*, pelo constante incentivo, ensinamentos transmitidos, amor e dedicação durante toda minha vida.

À minha avó *Davina*, pelo carinho e apoio.

À *Suelen* pelo companheirismo,
compreensão e paciência.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha mãe Glêide e meu pai Diorande, pelo apoio incondicional.

À Suelen Cristina Mendonça Maia, pelo amor, incentivo, companheirismo e ajuda.

Ao prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes, pela orientação, ensinamentos, paciência, apoio, compreensão e amizade.

À Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, pela oportunidade de realização do curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de estudo (processo: 2009/03351-3) e auxílio regular a pesquisa (processo: 2009/15258-8).

Aos funcionários do Departamento de Solos, pelo auxílio direto e indireto nos trabalhos, em especial aos funcionários José Carlos, Emerson, Silvia, Adriana, Depiere, Adilson, Noel, Jair e Pedro. E aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal Valéria, Dorival, Vera e Lana.

Ao prof. Dr. Rogério Peres Soratto, pela amizade e ensinamentos.

Aos amigos Laércio Augusto Pivetta, Laerte Gustavo Pivetta, Gustavo Castoldi, Samuel Fiorezi e Flavio Gurgacz pelo apoio, companheirismo e auxílio nos trabalhos de campo e processamento das amostras.

Aos estagiários Vinicius, Luciana e Samireille, pelo auxílio na realização desses trabalhos.

A todo o corpo docente da pós-graduação, pelo conhecimento transmitido e incentivo.

Aos funcionários da biblioteca pela atenção e correções das referências bibliográficas.

A INEOS sílicas pelo fornecimento do fertilizante silicatado.

A EMBRAPA Arroz e Feijão pelo fornecimento das sementes de arroz.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
1. RESUMO	01
2. SUMMARY	03
3. INTRODUÇÃO.....	05
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	07
4.1. Alumínio e acidez.....	07
4.2. Efeito do alumínio e acidez nas plantas	09
4.3. Arroz de terras altas.....	11
4.4. Tolerância de plantas ao alumínio.....	12
4.5. Silício	15
4.6. Silício e o alumínio	16
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
5.1. Localização dos experimentos	19
5.2. Experimento I.....	19
5.2.1. Delineamento experimental e tratamentos	19
5.2.2. Caracterização dos cultivares de arroz.....	19
5.2.3. Instalação e condução do experimento	20
5.2.4. Avaliações	23
5.2.4.1. Comprimento, área de superfície, volume e diâmetro médio radicular	23
5.2.4.2. Altura de plantas	23
5.2.4.3. Número de perfilhos por planta	23
5.2.4.4. Produção de matéria seca e teores de nutrientes do sistema radicular e parte aérea.....	24
5.2.4.5. Quantidade acumulada de nutrientes na raiz, parte aérea e absorvida por metro de raiz	24
5.3. Experimento II.....	24
5.3.1. Delineamento experimental	24

5.3.2. Instalação e condução do experimento	25
5.3.3. Avaliações	26
5.3.3.1. Altura de plantas, número de perfilhos por planta, produção de matéria seca, teores e acúmulos de nutrientes da parte aérea	26
5.3.3.2. Número de colmos por metro quadrado	27
5.3.3.3. Porcentagem de colmos férteis	28
5.3.3.4. Número de panículas	28
5.3.3.5. Número total de espiguetas por panícula.....	28
5.3.3.6. Número de espiguetas granadas e chochas por panícula.....	28
5.3.3.7. Fertilidade das espiguetas	28
5.3.3.8. Massa de 1000 grãos.....	28
5.3.3.9. Produtividade de grãos	28
5.3.3.10. pH, matéria orgânica, soma de bases, capacidade de troca de cátions, saturação por bases, teores de nutrientes, Si e Al ³⁺ do solo após a colheita do experimento.....	29
5.4. Análise estatística.....	29
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
6.1. Experimento I.....	30
6.2. Experimento II.....	56
7. CONCLUSÕES.....	81
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1	Composição da solução estoque e solução nutritiva utilizada para estudo de tolerância de plantas de arroz na tolerância ao alumínio 21
2	Característica química do solo utilizado no experimento 25
3	Micronutrientes e silício no solo utilizado para o experimento 25
4	Fungicidas utilizados durante a condução do experimento 26
5	Média de comprimento de raiz, área de superfície, volume e diâmetro médio em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento 31
6	Média de altura de plantas, número de perfilhos por planta, matéria seca da parte aérea e matéria seca de raiz em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento 33
7	Média do teor na parte aérea de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e Si em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento 36
8	Média do teor na raiz de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e Si em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento 36
9	Média do acúmulo na parte aérea de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e Si em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento 37
10	Média do acúmulo na raiz de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e Si em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento 38
11	Média de absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e Si por metro de raiz em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento 54
12	Média do teor de alumínio na parte aérea e raiz, acúmulo de alumínio na parte aérea e raiz e alumínio absorvido por metro de raiz em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento 55

Tabela	Página
13 Média de altura de planta, número de colmos por metro quadrado, número de perfilho por planta e número de panículas por metro quadrado em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.....	58
14 Média de porcentagem de colmos férteis, número espiguetas por panícula, número de espiguetas granadas por panículas e número de espiguetas chochas por panículas em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.....	59
15 Média de fertilidade de espiguetas, matéria seca da parte aérea, massa de 1000 grãos e produtividade de grãos em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento	63
16 Média de teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na folha bandeira das plantas em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.....	67
17 Média de teor de alumínio na folha bandeira e acúmulo de alumínio na parte aérea total das plantas em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.....	70
18 Média de acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento	74
19 Média de pH, matéria orgânica, fósforo, alumínio, hidrogênio+alumínio potássio, cálcio, magnésio, soma de bases capacidade de troca de cátions e saturação por bases do solo em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento	76
20 Média do teor de boro, cobre, ferro, manganês, zinco e silício do solo em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Distribuição relativa das espécies de Al em solução do solo	8
2 Comprimento (A), Superfície (B), Volume (C) e Diâmetro médio radicular (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.....	31
3 Altura de plantas (A), número de perfilhos por planta (B), matéria seca de parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.....	32
4 Teor de nitrogênio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de nitrogênio na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	35
5 Teor de fósforo na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de fósforo na parte aérea(C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	39
6 Teor de potássio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de potássio na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	40
7 Teor de cálcio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de cálcio na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	41
8 Teor de magnésio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de magnésio na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	42
9 Teor de enxofre na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de enxofre na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	44
10 Teor de boro na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de boro na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	45

Figura	Página
11 Teor de cobre na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de cobre na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	47
12 Teor de ferro na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de ferro na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	48
13 Teor de manganês na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de manganês na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	49
14 Teor de zinco na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de zinco na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	51
15 Teor de silício na parte aérea (A) e raiz (B), acúmulo de silício na parte aérea (C) e raiz (D) e silício absorvido por metro de raiz (E) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	52
16 Teor de alumínio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de alumínio na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	55
17 Altura de plantas (A), número de colmos por metro quadrado (B), número de perfilho por planta (C) e número de panículas por metro quadrado (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	57
18 Porcentagem de colmos férteis (A), número de espiguetas por panícula (B), número de espiguetas granadas por panícula (C) e número de espiguetas chochas por panícula (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	59
19 Fertilidade de espiguetas (A), matéria seca da parte aérea (B), massa de 1000 grãos (C) e produtividade de grãos (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	62

Figura	Página
20 Teor de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E), enxofre (F) e silício (G) na folha bandeira dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	66
21 Teor de boro (A), cobre (B), ferro (C), manganês (D), zinco (E) e alumínio (F) na folha bandeira dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	69
22 Acúmulo de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E), enxofre (F) e silício (G) na parte aérea dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	71
23 Acúmulo de boro (A), cobre (B), ferro (C), manganês (D), zinco (E) e alumínio (F) na parte aérea dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	73
24 pH (A), matéria orgânica (B), soma de bases (C), capacidade de troca de cátions (D) e saturação de bases (E) do solo cultivado com cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	75
25 Teor de fósforo (A), alumínio (B), hidrogênio + alumínio (C), potássio (D), cálcio (E) e magnésio (F) do solo cultivado com cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.....	77
26 Teor de boro (A), cobre (B), ferro (C), manganês (D), zinco (E) e silício (F) do solo cultivado com cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício	79

1. RESUMO

O arroz de terras altas tem características de rusticidade, tendo certa tolerância à acidez do solo e toxidez por alumínio, ferro, manganês e acumula altos níveis de silício. O silício absorvido proporciona às plantas melhorias, entre elas ameniza a toxidez por alumínio. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a interação do silício na tolerância de plantas de arroz a alumínio. Foram instalados dois experimentos em casa de vegetação, o primeiro foi conduzido em solução nutritiva, e o segundo em vasos com solo, ambos utilizaram delineamento em blocos inteiramente casualizados, em esquema fatorial 2 x 5, com quatro repetições. Os tratamentos de ambos experimentos foram constituídos por dois cultivares de arroz de terras altas (BRS Talento - não tolerante e Guarani - tolerante ao Al tóxico), e cinco doses de Si (0, 30, 60, 90 e 120 mg dm⁻³). No experimento I as plantas ficaram quatorze dias na solução nutritiva com Si e em seguida, trocou-se a solução retirando o Si e adicionando 40 mg dm⁻³ de Al³⁺, e no experimento II, utilizou-se solo naturalmente alumínico. Para o experimento I em solução nutritiva, foram avaliados: comprimento, área de superfície, volume e diâmetro médio radicular, altura de planta, número de perfilhos por planta, produção de matéria seca e teores de nutrientes do sistema radicular e da parte aérea e quantidade acumulada de nutrientes na raiz, parte aérea e absorvida por metro de raiz. No experimento II em vasos com solo, foram realizadas as seguintes avaliações: altura da planta, número de perfilhos por planta, produção de matéria seca, teores e acúmulo de nutrientes da parte aérea, número de colmos por metro quadrado, porcentagem de colmos férteis, número de panículas, número total de espiguetas por panícula, número de espiguetas granadas e chochas por

panícula, fertilidade das espiguetas, massa de 1000 grãos, produtividade de grãos e pH, matéria orgânica, soma de bases, capacidade de troca de cátions, saturação por bases, teores de nutrientes, Si e Al^{3+} do solo após a colheita do experimento. No experimento I não houve interação do Si adicionado a solução nutritiva na tolerância dos cultivares de arroz de terras altas, Guarani e BRS Talento, ao Al^{3+} , disponibilizado as plantas após o Si. Com o aumento do teor de Si na parte aérea, não houve decréscimo do teor de Al^{3+} nas plantas independente dos cultivares. No experimento II quando do fornecimento do Si ao solo naturalmente alumínico o Si ameniza a toxidez ao Al^{3+} para o cultivar BRS Talento, aumentando sua produtividade. O Si promove decréscimo no teor de Al^{3+} na parte aérea dos cultivares Guarani e BRS Talento.

Palavra chave: *Oryza sativa* L., silício, alumínio, nutrição

SILICON IN ALUMINUM TOLERANCE ON RICE PLANTS. Botucatu, 2011. 100p.

Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: LUCAS BARBOSA DE FREITAS

Adviser: DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

2. SUMMARY

The upland rice (*Oryza sativa* L.) has characteristics of rusticity, having some tolerance to soil acidity and toxic aluminum, iron, manganese and accumulate high levels of silicon. The silicon absorbed provides the plant improvements, including alleviates toxic aluminum. Given the above, the objective was to evaluate the interaction of silicon on tolerance of rice plants to aluminum. Two experiments were established in the greenhouse, the first was conducted in nutrient solution, and the second in pots with soil, both used in a completely randomized design in factorial 2 x 5 with four replications. The treatments of both experiments consisted of two cultivars of upland rice (BRS Talento - not tolerant and Guarani - tolerant to Al toxicity), and added five doses Si (0, 30, 60, 90 and 120 mg dm⁻³). In experiment I, plants were fourteen days in nutrient solution with Si and then changed the solution by removing the Si and adding 40 mg dm⁻³ Al³⁺, and in experiment II we used soil naturally aluminate. For the first experiment in nutrient solution were evaluated: length, surface area, volume and average root diameter, plant height, number of tillers-per-plant, dry matter production, nutrient content of root and shoot and total quantity of nutrient in root, shoot and absorbed per meter of root. In experiment II in pots with soil, the following evaluations were made: plant height, number of tillers per plant, dry matter production, nutrient content of shoots, number of stems per square meter, percentage of fertile stalks, number of panicles, total number of spikelets per panicle, number of spikelets per panicle were empty and grenades, spikelet fertility, 1000 grain weight, grain yield and pH, organic matter,

total bases, cation exchange capacity, base saturation, nutrient content, Si e Al^{3+} in the soil after harvest experiment. In the experiment I, there wasn't interaction of Si added to the nutrient solution on tolerance of cultivars of upland rice, Guarani and BRS Talento, to plants available after Si. With increasing content of Si in the shoot, there was no decrease in the amount de Al^{3+} in plants regardless of cultivar. In experiment II when the supply of Si to the soil naturally aluminate, Si alleviates toxic Al^{3+} for BRS Talento, increasing yield. Si promotes decrease in the amount of Al^{3+} in the shoots of the cultivars Guarani and BRS Talento.

Keywords: *Oryza sativa* L., silicon, aluminum, nutrition

3. INTRODUÇÃO

A toxicidade ao alumínio (Al^{3+}) é um dos principais limitantes da produtividade em solos ácidos, os quais representam grande área com capacidade produtiva em regiões tropicais e subtropicais. Solos ácidos estão presentes em cerca de 40% da superfície terrestre (KOCHIAN, 1995), e 70% dos solos potencialmente cultiváveis do mundo (PIÑEROS et al., 2002). No Brasil, a ocorrência de solos com problemas de toxidez de Al^{3+} é da ordem de 60%, considerando-se as terras com potencial para atividades agrícolas. Em geral o valor de pH da maioria dos solos brasileiros varia entre 3,7 e 5,5, e o Al^{3+} é o cátion predominante em mais de um terço dos solos com pH inferior a 5,6 (ABREU JR. et al., 2003).

A prática menos dispendiosa visando eliminar o Al^{3+} presente no solo é a calagem. Entretanto, inicialmente o calcário corrige apenas as camadas superficiais do solo e o subsolo permanece ainda ácido, podendo restringir o crescimento das raízes das cultivares sensíveis ao Al^{3+} . Desta forma, as plantas têm maior suscetibilidade à seca, por serem impedidas de obter água das camadas mais profundas do solo, o que diminuiu a produção de grãos.

O Al^{3+} também interfere na absorção e movimentação do fósforo, cálcio, magnésio e molibdênio. Sob o estresse desse elemento, as plantas paralisam seu crescimento radicular, reduzem a absorção de nutrientes, principalmente fósforo, cálcio, magnésio e potássio, refletindo num declínio na produção.

O arroz de terras altas tem características de rusticidade, tendo assim certa tolerância à acidez do solo e à toxidez por Al^{3+} . Mesmo assim, o cultivo do arroz em

solos com altos níveis de Al^{3+} pode limitar o crescimento radicular das plantas, limitando assim o potencial produtivo do cultivar.

Além disso, as plantas de arroz absorvem e acumulam elevadas quantidades de silício (Si). O Si traz benefícios na amenização da toxidez ao Al^{3+} em plantas de arroz. Dessa forma, é possível que o Si tenha participação na tolerância ao Al^{3+} pelas plantas de arroz de terras altas.

Assim, o objetivo deste trabalho foi de avaliar a interação do silício na tolerância de plantas de arroz a Al^{3+} .

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Alumínio e acidez

O Al^{3+} é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre (8% da constituição) (DELHAIZE e RYAN, 1995; MATSUMOTO, 2000; ROUT et al., 2001), estando atrás em ordem de abundância, do oxigênio (O_2) e silício (Si). Com o processo natural ou antrópico de acidificação dos solos, a estabilidade química dos compostos de Al^{3+} é reduzida, com isso, aumenta a solubilidade dos minerais. Assim, o Al^{3+} é liberado para a solução do solo em maior ou menor quantidade, tornando-se potencialmente prejudicial ao desenvolvimento e produção da maioria das plantas cultivadas (MA et al., 2001).

De acordo com o pH da solução do solo (Figura 1), há uma forma predominante de espécie química de alumínio (Al) (BERTSCH e PARKER, 1995; CARVALHO, 2003), o Al, no solo, pode se apresentar na forma livre, ligado ao sulfato (AlSO_4^+), ao fluoreto (AlF^{2+}), ao fosfato ($\text{AlH}_2\text{PO}_4^{2+}$), com ligantes orgânicos (Al-orgânico), pode estar na forma de polímeros (polinúcleos de Al) (BLOOM e ERICH, 1996) e complexado com hidróxidos (AlOH^{2+} , Al(OH)_2^+ , Al(OH)_3^0 e Al(OH)_4^-) que são relativamente insolúvel e não são absorvidos pelas plantas (DELHAIZE e RYAN, 1995),

Em pH ácido, menor que 5,0 o alumínio trivalente existe como hexahidrato octaedral ($\text{Al(H}_2\text{O)}_6^{3+}$) que por convenção é chamado de Al^{3+} (WRIGHT, 1989). Onde 90% do Al está na forma Al^{3+} , a forma mais tóxica ao crescimento vegetal, sendo um dos principais fatores limitantes à produção na maioria das espécies vegetais em solos ácidos.

Com o aumento do pH, a forma $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ sofre sucessivas perdas de prótons pela hidrólise do Al, ficando na forma $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ e $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ (KOCHIAN, 1995).

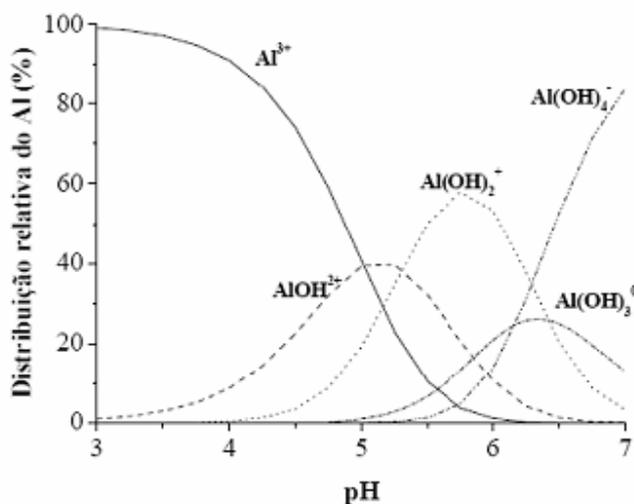


Figura 1. Distribuição relativa das espécies de Al em solução do solo (BERTSCH e PARKER, 1995).

Kinraide (1991) estimou que a espécie Al livre (Al^{3+}) é vinte vezes mais tóxica que AlSO_4^+ e trinta vezes mais que AlF^{2+} . Os complexos com ligantes orgânicos também são considerados não tóxicos ou pouco tóxicos (HUE e AMIEN, 1989; MIYASAWA, 1992; HUE e LICUDINE, 1999).

Em termos práticos, nos solos com pH superior a 5,5, geralmente, a concentração de Al^{3+} tóxico na solução está abaixo de 1 mg L^{-1} , não causando problemas as plantas; já em pH baixo a concentração é elevada, sendo tóxico as plantas cultivadas. Em geral, nos solos brasileiros considera-se como prejudicial às plantas o teor de Al trocável acima de $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (MALAVOLTA, 1980).

O conhecimento da química do alumínio em solos ácidos é de grande interesse, principalmente, devido aos efeitos nocivos do íon Al^{3+} no crescimento vegetal. A acidez do solo limita a produção agrícola, decorrendo da interação de vários fatores, tais como o aumento da concentração de H^+ , Al^{3+} e Mn^{2+} , a diminuição das concentrações dos cátions Mg^{2+} , Ca^{2+} e K^+ e, da solubilidade de fósforo e molibdênio. Isso se dá devido ao o Al com três valências, ser mais fortemente atraído para as proximidades das partículas com cargas negativas, em detrimento do sódio (Na^+) e potássio (K^+) com uma valência, e do cálcio (Ca^{2+})

e magnésio (Mg^{2+}) com duas valências. Com isto, o Al^{3+} permanece no solo, enquanto os outros cátions tendem a serem lixiviados. Esta é a razão que faz os solos tropicais terem muito Al^{3+} e baixos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ na forma trocável (BOHNEN, 2000).

Além disso, o Al^{3+} na solução do solo provoca redução da atividade microbiana benéfica para as plantas e menor desenvolvimento. Além do aumento de doenças, principalmente as fúngicas em razão da má nutrição das plantas, que prejudicam o seu crescimento (MARSCHNER, 1995; FAGERIA e STONE, 1999; FREITAS et al., 2006). Esse conjunto de fatores pode variar de acordo com a espécie e genótipos de planta, tipo e horizonte do solo, valor de pH, concentração e espécie de Al^{3+} , estrutura e aeração do solo e clima.

4.2. Efeito do alumínio e acidez nas plantas

O efeito da acidez do solo sobre as plantas provém principalmente pelas alterações químicas, entre elas: quando o pH do solo é menor que 5,5, e na presença de Al^{3+} o mesmo solubiliza-se na solução do solo, tornando-se potencialmente tóxico para as plantas (KOCHIAN, 1995). Em outras palavras, o Al^{3+} presente na solução do solo e, principalmente, o Al^{3+} que se encontram hidratados possuem propriedades químicas capazes, de quando em contato com a água, faz com que esta seja decomposta, liberando íons hidrogênio, que podem reduzir o pH do solo, mediante reação de hidrólise (LUCHESE et al., 2001).

O primeiro sintoma de toxidez causado por Al^{3+} , que acontece inclusive em variedades tidas como tolerantes, porém em menor grau, é a inibição do crescimento e desenvolvimento das raízes, a qual ocorre cerca de 1 a 2 horas após a exposição ao Al^{3+} (KOCHIAN, 1995), influenciando negativamente também a absorção radicular de água e nutrientes (SILVA et al., 1984; BRONDANI e PAIVA, 1996). O Al^{3+} , quando em contato com as raízes, promove rapidamente a paralisação do crescimento radicular, tornando-as atrofiadas em função da morte ou injúria do meristema radicular. Especificamente, a parte distal da zona de transição no ápice das raízes, onde as células estão entrando em fase de alongamento, é o sítio da ação tóxica primária do Al (SIVAGURU e HORST, 1998).

O íon Al^{3+} , então, interfere na divisão celular da raiz principal e das raízes laterais e também aumenta a rigidez da parede celular, reduz a replicação do DNA,

altera as proteínas de transporte na membrana (MEHARG, 1993) e interfere na atividade de muitas enzimas (SLASKI, 1990; COPELAND e DELIMA, 1992).

O Al^{3+} também forma fortes ligações com compostos de oxigênio, este pode interagir com múltiplos sítios no apoplasto e simplasto nas raízes das células. Assim, a ligação do Al com estas substâncias são, provavelmente, um importante fator de toxicidade (MA et al., 2001). Devido à forte interação com os fosfolipídios de membrana e a peroxidação de lipídios, o Al^{3+} também pode provocar alterações na permeabilidade da membrana plasmática (AHN et al., 2001; KOCHIAN, 1995; YAMAMOTO et al., 2001).

Ainda, o Al^{3+} fixa fósforo em formas não disponíveis nas superfícies da raízes, diminuindo a respiração desta, além de interferir na atividade das enzimas de fotofosforilação, reduzindo a absorção, transporte, e a eficiência de uso de água e vários nutrientes essenciais (Ca, Mg, K, P e Fe), entre outros efeitos diretos e indiretos (FLEMING et al., 1974; NICHOL e OLIVEIRA, 1995).

O Al^{3+} também influencia na mudança da homeostase celular do Ca^{2+} e da competição por canais de Ca^{2+} . A inibição da absorção celular de Ca^{2+} pelo Al^{3+} afeta vários processos celulares, tais como, mitose, citocinese, crescimento polar, correntes citoplasmáticas e sinalização celular (HUANG et al., 1996; ZHANG e RENGEL, 1999) e pode interagir e inibir a enzima fosfolipase C associada às vias de transporte do Ca (JONES e KOCHIAN, 1995).

O efeito do Al^{+3} no crescimento da parte aérea é apresentado como uma consequência dos danos causados por esse metal no sistema radicular, especialmente com relação às deficiências na absorção de água e nutrientes provocadas (MATSUMOTO et al., 1976). Onde pode haver sintomas, porém os sintomas de toxicidade ao Al^{3+} não são facilmente identificáveis. Nas folhas, se assemelham a deficiência de fósforo, retardando o crescimento global da planta, o que pode levar a ocorrência de folhas pequenas, escuras e com maturidade precoce, além do encurtamento dos talos. Elevadas concentrações de Al^{+3} também pode induzir a deficiência e sintomas de deficiência de ferro em arroz, sorgo e trigo (CLARK et al., 1981; FURLANI e CLARK, 1981).

Plantas afetadas por Al também apresentam sintomas de deficiência de nutrientes, tais como P, Ca, Mg, K e Mo, devido à interferência do Al^{+3} nos processos de absorção, transporte e uso destes nutrientes. Tais deficiências aparentemente ocorrem porque o

Al^{3+} induz a deposição de calose nos canais plasmodesmáticos, inibindo fisicamente o transporte simplástico entre células (SIVAGURU et al., 2000).

Vilela e Anglinoni (1984) relatam que a presença de altas concentrações de Al^{3+} tóxico no solo paralisam o crescimento radicular, provocando aumento no diâmetro radicular. Vasconcelos et al. (2002), estudando dois cultivares de arroz (Comum Branco e IAC 899), verificaram decréscimo no alongamento celular com o aumento dos níveis de Al na solução nutritiva.

Sivaguru et al. (1992) verificaram que a toxidez de Al^{3+} em arroz, promove reduções na massa seca e no número de raízes, no comprimento e na área radicular, freqüentemente associados ao aumento do raio médio e volume de raízes. Na parte aérea têm sido descritas reduções na massa seca e na altura de plantas (SIVAGURU e PALIWAL, 1993).

4.3. Arroz de terras altas

Entre as culturas anuais, o arroz é a mais importante no mundo, pois constitui a dieta básica de mais de 50% da população mundial. A maior área cultivada e o maior consumo de arroz estão na Ásia (FAGERIA et al., 2004). O arroz no Brasil é cultivado em dois ecossistemas de produção denominados terras altas e irrigado por inundação, sob diferentes sistemas de cultivo. O ecossistema de terras altas, que engloba o sistema de produção sem uso de irrigação, é o mais difundido territorialmente.

Considerando os diferentes tipos de arroz produzidos e consumidos mundialmente, a produção mundial foi de 680 milhões de toneladas em 2009, sendo que cerca de 25% desta produção é oriunda do sistema de cultivo de terras altas. No Brasil o cultivo de arroz no ecossistema de terras altas corresponde a 65 % da área total cultivada com a cultura no país, contribuindo com apenas 40,9% da produção nacional (YOKOYAMA, 2002). Esta situação é função da baixa produtividade obtida no sistema de cultivo sem irrigação, uma vez que a cultura está mais exposta à instabilidade do clima.

O cultivo do arroz de terras altas sempre esteve associado à abertura de fronteira agrícola, onde normalmente obtém-se baixas produtividades, que é resultado do cultivo em solos de baixa fertilidade, como os solos de cerrado, principalmente com elevada

acidez, baixa capacidade de troca de cátions e de retenção de umidade, deficiência generalizada de nutrientes, particularmente o fósforo, associada a teores elevados de Al e alta saturação de Al no complexo do solo. A baixa produtividade também é devido à baixa tecnologia empregada pelos produtores.

Mesmo o arroz de terras altas apresentando características de rusticidade, tendo assim certa tolerância a baixo pH e V% e ao Al^{3+} (FORNASIERI FILHO e FORNASIERI, 2006), esses fatores limitam o crescimento das raízes nos primeiros centímetros do solo, na maioria das vezes a menos de 10 cm, onde se concentra a matéria orgânica. Em consequência, ocorre redução do volume de solo explorado pelas raízes, impossibilitando que as plantas desenvolvam todo seu potencial produtivo, principalmente pelo pequeno crescimento radicular, que impede que a planta busque água em camadas mais profundas do solo, assim se tornando mais suscetíveis ao estresse hídrico, e também a limitada absorção de nutrientes, limitando assim o potencial produtivo do cultivar.

A maneira menos onerosa de se corrigir o pH e precipitar o Al^{3+} é com a calagem, porém, a calagem corrige apenas as camadas superficiais do solo e o subsolo permanece ainda ácido, podendo restringir o crescimento das raízes das cultivares sensíveis ao Al^{3+} e até cultivares tolerantes, diminuindo seu potencial produtivo (FOY et al., 1965; CAMARGO et al., 1998).

Dessa forma, a obtenção de cultivares tolerantes à toxicidade ao Al^{3+} vem despertando o interesse de muitas áreas da pesquisa agrícola, particularmente quando se pretende explorar eficientemente solos com acidez subsuperficial e elevado nível de Al^{3+} , de difícil correção com manejo químico. Níveis elevados de Al^{3+} associados a períodos de deficiência hídrica reduzem drasticamente a produtividade, inviabilizando, às vezes, o cultivo em área de solos ácidos (SAWAZAKI e FURLANI, 1987)

4.4. Tolerância de plantas ao alumínio

Em arroz de terras altas os mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos na tolerância a Al^{3+} variam entre cultivares, e não são bem estabelecidos. Várias hipóteses têm sido propostas com base em resultados experimentais para explicar as diferenças nas plantas quanto a essa característica, dentre os quais: interações com nutrientes (Si x Al e

SO₄ x Al) (TANAKA et al., 1987; HODSON e EVANS, 1995; FISCHER et al., 1990; MA et al., 1997; SAVANT et al., 1997 WANG et al., 2004), ligações do Al à parede das células (FOY, 1988; TAYLOR, 1988; KOCHIAN, 1995; ROUT et al., 2001) e exudação de ácidos orgânicos pelas raízes (MA et al., 2001, RYAN et al., 2001), porém, é escassa a informação disponível sobre o mecanismo de tolerância no arroz, e inexistente a informação se a desintoxicação seria externa ou interna nesta cultura. Também há controvérsia entre pesquisadores com relação aos mecanismos de tolerância das plantas ao Al³⁺ tóxico.

Jo et al. (1997) dividem plantas tolerantes em dois grupos: I) mecanismos externos, em que as plantas tolerantes liberam ácidos orgânicos pela raiz, geralmente citrato e malato, que se ligam ao Al³⁺ formando complexos estáveis impedindo a absorção pela planta (PELLET et al., 1995; RYAN et al., 1995); II) mecanismos internos, em que o Al³⁺ é absorvido para o interior da planta e conseqüentemente para a célula, onde é inativado por alguma enzima ou isolado no interior do vacúolo.

Para Taylor (1995) e Kochian (1995), os mecanismos de tolerância ao Al³⁺ podem ser classificados em mecanismos de exclusão e mecanismos de tolerância interna. Onde, a tolerância ao Al³⁺ pode ser inter e intra-específica, sendo controlada por diferentes genes, os quais agem através de rotas bioquímicas distintas. A principal diferença entre os mesmos é o sítio de desintoxicação de Al³⁺ (simplasto - interno ou apoplasto - exclusão). Os mecanismos de exclusão desfavorecem que o Al³⁺ atravesse a membrana plasmática e penetre no simplasto. Os mecanismos de tolerância interna imobilizam, compartimentalizam ou desintoxicam o Al³⁺ que penetrou no simplasto (ZHENG et al., 1998).

Outra hipótese é a formulada por Yermiyahu et al. (1997) onde cita que embora a membrana plasmática seja considerada como um dos alvos do Al³⁺, em alguns casos, ela pode atuar como uma barreira à absorção deste elemento para o interior da célula. Foi observado que a densidade de cargas elétricas negativas presentes em membranas das células dos ápices radiculares de trigo eram, em média, 26% superior no genótipo sensível quando comparado ao tolerante. Assim, alterações na composição dos fosfolipídios da membrana plasmática podem contribuir para a tolerância ao Al³⁺, por dificultar a interação deste com a membrana plasmática.

Outra barreira para o Al³⁺ para atingir as regiões sensíveis do meristema radicular é a mucilagem, que é uma substância formada por polissacarídeos, que

reveste a superfície radicular. Em plantas de trigo tolerantes ao Al^{3+} , a síntese contínua de mucilagem nos ápices radiculares dificulta a penetração do Al^{3+} , protegendo as regiões de crescimento da raiz. A mucilagem pode ser responsável por reter até 35% do Al^{3+} presente no apoplasto (ARCHAMBAULT et al., 1996).

A síntese de calose, um poliglicosídeo formado por unidades de 1,3-a-glucano que se acumula na parede celular, também é uma resposta das plantas aos diversos tipos de estresses (SIMMONS et al., 1992). Alguns genótipos de trigo sensíveis ao Al^{3+} produzem mais calose do que genótipos tolerantes quando expostos a este elemento (ZHANG et al., 1994; LUGANY et al., 1995; HORST et al., 1997). Desta forma, o padrão de síntese de calose pode ser um bom indicativo do grau de injúria que o Al^{3+} causa nas raízes, podendo, inclusive, ser utilizado como um parâmetro de seleção.

A exsudação de ácidos orgânicos diminui a toxidez ao Al^{3+} em diferentes culturas (RYAN et al., 2001). Delhaize et al. (1993a; 1993b) em trabalhos realizados com trigo, verificaram que o Al^{3+} estimulou a exsudação dos ácidos málico e succínico. Para milho cultivado na presença de Al^{3+} , foi observada a exsudação dos ácidos cítrico, málico e trans-aconítico (PELLET et al., 1995, JORGE e ARRUDA, 1997).

Ma et al. (2001) propuseram dois modelos para explicar a indução de exsudação de ácidos orgânicos. O primeiro (I) o Al^{3+} ativa um canal iônico na membrana acontecendo então a exudação do ácido orgânico. Esse estímulo pode acontecer de três maneiras: (a) o Al^{3+} atua diretamente com a proteína do canal; (b) o Al^{3+} atua sobre um receptor específico (R) na superfície da membrana ou sobre a própria membrana desencadeando um efeito cascata via mensageiros secundários que ativa então o canal iônico; ou (c) o Al^{3+} atravessa a membrana, entra no citoplasma e ativa o canal diretamente ou através de mensageiros secundários. Em milho, esse é o modelo provável de ativação do efluxo dos ácidos orgânicos.

No modelo II de resposta, o Al^{3+} interage com a célula via uma proteína receptora (R) da membrana, que ativa a transcrição dos genes que codificam as proteínas envolvidas no metabolismo de ácidos orgânicos ou de seu transporte através da membrana plasmática (MA et al., 2001).

A capacidade de complexação dos ácidos está relacionada com a posição dos grupos OH/COOH da principal cadeia carbônica da molécula. Os ácidos mais

eficientes para a complexação e desintoxicação do Al^{3+} são o cítrico, o oxálico e o málico; no grupo de eficiência moderada, destacam-se o malônico e o salicílico e, no grupo de baixa eficiência, o succínico, o láctico e o fórmico (HUANG e VIOLANTE, 1986; HUE et al., 1986; MIYASAKA et al., 1991; MIYASAWA et al., 1992; DELHAIZE et al., 1993a; 1993b).

4.5. Silício

Embora a lei brasileira considere o Si micronutriente (BRASIL, 2004), o Si é considerado elemento benéfico (MALAVOLTA, 1980; EPSTEIN, 1999; KORNDÖRFER, 2006). Dessa forma, o efeito benéfico do silício nas plantas é mais evidente em cultivos sob condições de estresse (MA e TAKAHASHI, 2002). Isto acontece porque o Si é capaz de proteger as plantas contra vários estresses bióticos e abióticos (FAWE et al., 2001; LUX et al., 2002; MA e YAMAJI, 2006).

No solo o Si ocorre principalmente como mineral inerte das areias, quartzo (SiO_2 puro), caulinita, micas, feldspato e em outros argilo-minerais silicatados, sendo o óxido de silício (SiO_2) o mineral primário mais farto nos solos, constituindo a base da estrutura da maioria dos argilo-minerais (BARBOSA FILHO et al., 2001).

As principais formas de Si no solo de acordo com Korndörfer et al. (2003) são:

- Si solúvel (H_4SiO_4 Ácido monossilícico) facilmente aproveitável pelas plantas.
- Si estrutural em minerais silicatados.
- Si adsorvido ou precipitado com óxidos de Fe, Al e Mn.
- Sílica biogênica oriunda da decomposição da matéria orgânica do solo e constituída por formas amorfas (ou poliméricas de Si).

O Si no solo na forma solúvel H_4SiO_4 (ácido monossilícico) é facilmente absorvido pelas plantas (KORNDÖRFER et al., 2003). Ao ser absorvido, é facilmente translocado no xilema na forma H_4SiO_4 , tem tendência natural a se polimerizar sendo assim pouco móvel, pois após solidificado, torna-se imóvel na planta.

A absorção de Si traz inúmeros benefícios, principalmente ao arroz, que absorve e acumula elevadas quantidades (2,7 – 8,4%) (KORNDÖRFER et al., 1999b),

enquanto o macronutriente mais exigido por esta cultura, o nitrogênio, se encontra na faixa de 2,6 – 4,6% (FAGERIA, 1984a).

Efeitos benéficos da adubação com Si têm sido observados em várias espécies vegetais, especialmente quando estas estão submetidas a estresse biótico ou abiótico (SCHIMIDT et al., 1999; FARIA, 2000; TRENHOLM et al., 1999). A absorção de Si traz benefícios às culturas tais como: diminuição da transpiração (DATNOF et al., 2001), redução do ataque de pragas e doenças por se concentrar na epiderme das folhas, aumento da resistência ao acamamento e a eficiência fotossintética (DEREN, 2001). Também ameniza toxidez de Al, Fe, Mn e Na (FISCHER et al., 1990; MA et al., 1997; SAVANT et al., 1997) e estimula a produção de fitoalexinas (fenóis) (KORNDÖRFER et al., 1999a).

4.6. Silício e o alumínio

As acumulações de Al^{3+} e Si na parte aérea das plantas são mutuamente exclusivas, isto é, quando o Si é absorvido o Al^{3+} deixa de ser. A tolerância de algumas espécies ao Al^{3+} , entre outros fatores, pode estar associada à maior absorção e acumulação de Si nos tecidos da planta (COCKER et al., 1998). Os mecanismos envolvidos na interação do Si com o Al^{3+} ainda são poucos conhecidos, porém existem estudos com a adição de Si em solução nutritiva demonstrando a capacidade do Si estimular a produção de compostos orgânicos exsudados pelas raízes (ex.: Malato), estes, sendo capazes de complexar o Al^{3+} e ainda ser responsável pela co-deposição do Al^{3+} no interior da planta (SANGSTER e HODSON, 2001).

Os benefícios do Si na amenização da toxidez ao Al^{3+} , é baseada em dois aspectos: solução do solo e mecanismos internos das plantas (COCKER et al., 1998). Ma et al. (1997), citam que o efeito do Si na amenização do Al^{3+} tóxico é resultado na diminuição da concentração do Al^{3+} na solução do solo, onde formaria complexos Al-Si. Em contrapartida outros pesquisadores demonstram efeitos do Si na planta amenizando os efeitos tóxicos do Al^{3+} (HAMMOND et al., 1995; CORRALES et al., 1997; KIDD et al., 2001).

Kidd et al. (2001) citam que com o fornecimento de Si, a exudação de compostos fenólicos é maior em cultivares de milho resistentes ao Al^{3+} do que cultivares sensíveis.

Segundo Malavolta et al. (1997), o Si provavelmente diminui a atividade dos íons Al^{3+} na solução do solo, fazendo com que haja um melhor desenvolvimento das raízes, aumentando a velocidade de difusão dos nutrientes da solução do solo e, conseqüentemente, provocando uma maior absorção de nutrientes pelas raízes. Este mecanismo poderia diminuir a fitotoxidez por Al^{3+} e a carência de água e nutrientes nos solos originalmente tropicais e subtropicais e, em conseqüência, induzir aumento de produtividade por área cultivada. Entretanto a tolerância ao Al^{3+} da maioria das espécies de plantas ocorre em mecanismos internos da planta (MA et al., 2001).

Para a cultura do milho a concentração de Al^{3+} é fortemente reduzida com a aplicação de Si (MA et al., 1997). Na cultura do sorgo o Si também é demonstrado na amenização da toxidez por Al^{3+} , pois o Si inibe a penetração do Al^{3+} no cortex da raiz, indicando assim, que o Si pode complexar o Al^{3+} na raiz, contribuindo para exclusão do Al^{3+} da raiz (HODSON e SANGSTER, 1993).

Alguns estudos tem demonstrado que o Si pode amenizar a toxicidade ao Al^{3+} , não só por diminuir a atividade de Al^{3+} livre na solução do solo, mas também reduzindo toxidade dentro da planta (COCKER et al., 1998; BARCELO et al., 1993; GALVEZ e CLARK, 1991; HODSON e SANGSTER, 1993). Estes resultados indicam que a interação entre Si e Al^{3+} ocorre na planta, embora assim mesmo também pode haver formação de complexo Si e Al^{3+} fora da planta, contribuindo assim para a amenização da toxidez ao Al^{3+} .

Na presença de Si, 85 a 90 % do Al^{3+} absorvido pelas raízes das plantas permanece no apoplasto (CLARKSON, 1967). Onde seria co precipitado com outro elemento, isto é uma das possibilidades dos mecanismos internos de amenização do Al^{3+} proporcionado pelo Si (HODSON e EVANS, 1995).

Hammong et al. (1995), obtiveram maior crescimento de plantas de cevada submetidas a estresse por Al^{3+} e supridas com Si. Por outro lado Morikawa e Saigusa (2002) citam que mesmo com aplicação de Si não houve amenização da toxicidade ao Al^{3+} na cultura da cevada.

Alguns trabalhos em solução nutritiva citam a importância do Si em aliviar a toxidez causada pelo Al^{3+} em raízes de plantas (GALVEZ et al., 1987; HODSON e SANGSTER, 1999), por exemplo, a toxidez ao Al^{3+} no cultivar de trigo Espie 66 induzida por

1,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al^{3+} na solução foi superada parcialmente pela adição de 5,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Si (COCKER et al., 1998).

Ma et al. (1997) ao aplicar Si na cultura do milho observaram redução das concentrações de Al^{3+} , isto se deve a complexação do Al^{3+} na presença do Si. Barcelo et al. (1993) também citam a capacidade do Si em diminuir o efeito tóxico do Al^{3+} em solução nutritiva. Segundo os autores a presença de Si na solução diminuía a concentração de Al^{3+} e ocorria maior alongamento da raiz.

Wang et al. (2004) observaram que o Si reduziu a mobilidade de Al^{3+} no apoplasto de plantas de arroz devido sua acumulação na parede celular, assim, o Si auxilia na desintoxicação de Al^{3+} no apoplasto do ápice das raízes de plantas de milho.

Ainda não se sabe exatamente quais os mecanismos da planta que influenciam na interação entre Si e Al^{3+} , então novos trabalhos que venham esclarecer essas dúvidas são necessários.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Localização dos experimentos

Os experimentos foram instalados e conduzidos junto ao Departamento de Recursos Naturais – Ciência do Solo da Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Botucatu. O experimento I foi conduzido em casa de vegetação e o experimento II sob túnel plástico.

5.2. Experimento I

5.2.1. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, disposto em modelo fatorial 2x5 com quatro repetições, utilizando-se solução nutritiva, tendo dois vasos para cada repetição. Os tratamentos foram dois cultivares de arroz de terras altas (BRS Talento - não tolerante e Guarani - tolerante ao Al^{+3} tóxico) e cinco doses de Si (0, 30, 60, 90 e 120 mg dm^{-3}).

5.2.2. Caracterização dos cultivares de arroz

O cultivar BRS Talento foi lançado em 2002, é proveniente do Centro Nacional de Pesquisa Arroz e Feijão - EMBRAPA, resultado da seleção de uma população F3 (CT11257-7-2-M-M) X (Caroline X BG 402 X CR1113 X CAROLINE 1). Pertencente ao grupo moderno, apresenta porte baixo (85 - 105 cm), alta capacidade de perfilhamento, folhas curtas, eretas e pilosas, colmos fortes, exigente quanto a fertilidade do solo o que associa a bons índices de produtividade de grãos (TERRES et al., 2004), são cultivares sensíveis a déficit hídrico e exigem bom manejo com a água, moderadamente resistente a brusone e resistente ao acamamento. Apresenta ciclo semiprecoce (110 dias), 82 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo fino (EMBRAPA, 2010a; FORNASIERI FILHO e FORNASIERI, 2006; BRESEGHELLO et al., 1998). É considerado não tolerante ao Al^{3+} (SILVA, 2007).

O cultivar Guarani é proveniente de cruzamento o qual se obteve a linhagem CNA 4121 (número de registro no Banco Ativo de Germoplasma- Embrapa) que foi realizado pela Embrapa Arroz e Feijão em 1977 e foi lançada em 1986. Pertencente ao grupo tradicional, apresenta ciclo curto, floresce entre 75 e 90 dias após a semeadura, sua altura média esta em torno de 100 cm, mas pode variar de acordo com a fertilidade do solo, é moderadamente resistente a brusone e mancha dos grãos, suscetível ao acamamento, tem boa resistência a seca (EMBRAPA, 2010b; BRESEGHELLO et al., 1998). É considerado tolerante ao Al^{3+} (FERREIRA et al., 1995).

5.2.3. Instalação e condução do experimento

Com a finalidade de se obter plantas para o experimento, as sementes de arroz foram tratadas com carboxin + thiram (400 mL por 100 kg de sementes), posteriormente colocadas para germinar, no dia 24/09/2010, em papel de filtro distribuídas em uma linha continua na parte superior do papel com o eixo embrionário das sementes dispostos na vertical e distantes 1 cm entre si, contendo em torno de 32 sementes por papel filtro. O papel foi enrolado e umedecido.

Este material foi acomodado em germinador à temperatura média de 25°C com 8 horas de luz. Após 72h, quando foi observado o início da emergência da radícula, os rolos de papel foram colocados verticalmente em recipientes plástico contendo solução

nutritiva formulada por Furlani & Furlani (1988) (Tabela 1), com 1/5 da força iônica, sem Si e Al^{3+} . Os recipientes foram transferidos para bancadas dentro da casa de vegetação, com temperatura ambiente de 22°C a 27°C e umidade controlada.

Tabela 1. Composição da solução estoque e solução nutritiva utilizada para estudo de tolerância de plantas de arroz na tolerância ao alumínio.

Solução estoque		Sol.estoque L ⁻¹	Solução nutritiva	
Componentes	Concentração	Arroz	Nutrientes	Concentração
	g L ⁻¹	ml L ⁻¹	básica	mg L ⁻¹
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	270,0	1,2	Ca	57,3
NH ₄ NO ₃	33,8		K	33,6
KCl	18,6	0,9	Mg	8,1
K ₂ SO ₄	44,0		N-NO ₃ ⁻	59,7
KNO ₃	24,6		N-NH ₄ ⁺	7,4
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	142,6	0,6	P	0,4
KH ₂ PO ₄	17,6	0,1	S	6,9
FeSO ₄ .7H ₂ O	24,1	0,3	Cl	7,6
NaEDTA	25,1		Fe	1,3
MnCl ₂ .4H ₂ O	2,34	0,3	Mn	0,16
H ₃ BO ₃	2,04		B	0,09
ZnSO ₄ .7H ₂ O	0,88		Zn	0,05
CuSO ₄ .5H ₂ O	0,20		Cu	0,02
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0,26		Mo	0,03
AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	52,77	13,4	Al	40,00
SiK	156,00	0,19	Elemento	30,0
		0,38	benéfico Si	60,0
		0,57		90,0
		0,76		120,0

Os rolos de papel permaneceram nos recipientes com 1/5 da solução durante 7 dias, e no dia 05/10/2010 as plantas foram selecionadas quanto à uniformidade de

forma e tamanho, e transferidas para vasos plásticos, contendo 4 L de solução nutritiva descrita por Furlani e Furlani (1988), à meia força iônica. As tampas utilizadas para fixar as plantas foram confeccionadas a partir de placas de isopor perfuradas para acoplar oito plantas por vaso, presas por pedaços de espuma, possibilitando as raízes entrar em contato com a solução nutritiva.

Após uma semana, no dia 12/10/2010, a solução nutritiva foi trocada por uma de força total sem os tratamentos com silício. Visando fazer com que as plantas tivessem maior desenvolvimento e maior quantidade de material vegetal para análise, as plantas ficaram na solução nutritiva com força total por duas semanas, onde no dia 19/10/2010 a solução foi renovada novamente. No dia 26/10/2010 a solução nutritiva foi trocada e adicionado os tratamentos com Si. No dia 02/11/2010, a solução nutritiva foi renovada, adicionando novamente os tratamentos com Si. Após uma semana, no dia 09/11/2010 trocou-se a solução nutritiva retirando o Si e adicionando 40 mg dm^{-3} de Al^{3+} , sob a forma de $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Portanto, as plantas ficaram quatorze dias na solução nutritiva com Si e em seguida, trocou-se a solução retirando o Si e adicionando o Al^{3+} , ficando mais sete dias na solução nutritiva. No dia 16/11/2010 realizou-se a colheita do experimento.

A fonte de Si utilizada foi o silicato de potássio, sendo o potássio retirado em coluna catiônica. O silicato continha as seguintes garantias: $156000 \text{ mg dm}^{-3}$ de Si e 88 mg dm^{-3} de K.

Quanto a fonte de Al^{3+} , utilizou-se o $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Pois antes da instalação do experimento, foi realizado pré teste onde foi comparado o $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ao $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, e também concentrações. Optou-se pelo $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ pois foi eficiente no pré teste em manter os teores de Al^{3+} na solução nutritiva, e gerar toxidez para as plantas de arroz, e é a fonte recomendada por Furlani e Furlani (1988).

Durante todo o período do experimento a solução nutritiva foi aerada e o pH monitorado diariamente, mantendo-o em torno de 4,0, utilizando-se para sua correção NaOH a $0,1 \text{ Mol L}^{-1}$ e HCl a $0,1 \text{ Mol L}^{-1}$.

A solução nutritiva foi renovada semanalmente adicionando-se os respectivos tratamentos, e as perdas por evapotranspiração foram repostas diariamente com água desmineralizada.

5.2.4. Avaliações

5.2.4.1. Comprimento, área de superfície, volume e diâmetro médio radicular

Na colheita do experimento, as raízes foram separadas da parte aérea e lavadas em água corrente sobre peneiras com malha de 0,5 mm. Do material lavado amostrou-se aproximadamente 30% do sistema radicular, acondicionando em coletor universal, com solução de 30% de álcool + 70% de água comum. Em seguida foi levado à geladeira à temperatura de 4°C, onde foram mantidas até o momento da avaliação.

As avaliações de comprimento (m vaso^{-1}), área de superfície ($\text{cm}^2 \text{ vaso}^{-1}$), volume ($\text{cm}^3 \text{ vaso}^{-1}$) e o diâmetro médio (mm) radicular foram realizadas por meio de digitalização de imagens em scanner tridimensional, desenvolvido para este fim, acoplado a um computador dotado do Software WinRhizo.

Para obtenção dos resultados por vaso, após a realização das leituras no WinRhizo, as amostras foram levadas até estufa com circulação forçada de ar, a 65°C até peso constante. Posteriormente com a massa seca dessas amostras, foi estimado os valores de comprimento (m vaso^{-1}), área de superfície ($\text{cm}^2 \text{ vaso}^{-1}$), volume ($\text{cm}^3 \text{ vaso}^{-1}$) levando em consideração a matéria seca de raiz total, utilizando a seguinte equação MS total de raiz x comprimento de raiz (amostra)/MS amostra de raiz.

5.2.4.2. Altura da planta

A altura da planta foi determinada, medindo-se a distância entre o colo da planta até a extremidade superior da folha mais alta, no momento da colheita. Sendo representada pela média das plantas no vaso.

5.2.4.3. Número de perfilhos por planta

O número de perfilhos por planta foi determinado na colheita do experimento, em razão da contagem do número de perfilhos por planta.

5.2.4.4. Produção de matéria seca e teores de nutrientes do sistema radicular e da parte aérea

A parte aérea e os 70% aproximadamente restante das raízes das plantas, após lavagem, foram secas em estufa com circulação forçada de ar, a 65°C até peso constante. Posteriormente foi determinada a matéria seca, e as amostras da parte aérea e raízes foram moídas para posterior avaliação química para determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, B e Al segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997) e Si (KORNDÖRFER, 2004).

Para matéria seca de raiz, após realizar as análises no WinRhizo, as amostras foram levadas a estufa e a massa seca obtida foi acrescida na massa seca total obtida anteriormente.

5.2.4.5. Quantidade acumulada de nutrientes na raiz, parte aérea e absorvida por metro de raiz.

Através dos dados de produção de matéria seca e dos teores de nutrientes da raiz e da parte aérea, foi determinada a quantidade acumulada de nutrientes no sistema radicular e na parte aérea, respectivamente. O cálculo foi obtido multiplicando os valores de teores pelos valores de matéria seca. De posse dos resultados de acúmulo de nutriente na parte aérea, foi realizada quantificações de nutrientes absorvidas por metro de raiz, através da razão: quantidade acumulada de nutrientes na parte aérea/comprimento radicular.

5.3. Experimento II

5.3.1. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, disposto em modelo fatorial 2x5 com quatro repetições, utilizando-se vasos com solo. Os tratamentos

foram dois cultivares de arroz de terras altas (BRS Talento - não tolerante e Guarani - tolerante ao Al^{3+} tóxico), e cinco doses de Si (0, 30, 60, 90 e 120 mg dm^{-3}).

5.3.2. Instalação e condução do experimento

O experimento II foi conduzido sob túnel plástico, e em vasos. Foram utilizados como parcela experimental vasos com capacidade para 40 litros de solo ($0,4 \times 0,4 \times 0,3 \text{ m}$). O solo utilizado foi de baixa fertilidade natural, e naturalmente alumínico, classificado como Latossolo Vermelho Escuro, textura média arenosa (CARVALHO et al., 1983), cujas características químicas antes da instalação do experimento encontram-se na Tabela 2 e 3.

Tabela 2. Característica química do solo utilizado no experimento.

pH	M.O. g dm^{-3}	P_{resina} mg dm^{-3}	Al^{3+}	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V	S
			----- $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ -----							%	mg dm^{-3}
4,1	15	7	11	69	0,7	5	3	9	78	11	7

Tabela 3. Micronutrientes e silício no solo utilizado para o experimento.

Boro	Cobre	Ferro	Manganês	Zinco	Silício
		----- mg dm^{-3} -----			mg kg^{-1}
0,28	1,0	72	1,0	0,2	2,0

No dia 7/01/2010 o solo foi peneirado e em seguida colocado nos vasos. A semeadura dos dois cultivares de arroz foi realizada no dia 08 de janeiro de 2010. Antes da semeadura as sementes foram tratadas com carboxin + tiram (60 + 60 g do i.a. por 100 kg de sementes) e tiametoxam (140 g do i.a. por 100 kg de semente). A semeadura foi realizada utilizando 100 sementes em $0,40 \text{ m}$ por unidade experimental.

A emergência dos cultivares foi verificada dia 14/01/2010 e 16/01/2010 para os cultivares Guarani e BRS Talento respectivamente. Após a emergência das plantas no dia 18/01/2010 foi realizado desbaste, de modo que cada unidade experimental apresentasse 30 plantas.

A adubação na semeadura foi realizada de acordo com as recomendações de Novais et al. (1991). Como fonte de N, P, K e Mg utilizou-se uréia, superfosfatotriplo, cloreto de potássio e cloreto de magnésio, respectivamente. A adubação

nitrogenada foi dividida em 3 vezes, sendo, a primeira aplicada na semeadura, a segunda no dia 09/02/2010 e a terceira dia 04/03/2010.

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 potássio foi balanceado em todas as parcelas que foram aplicado o silicato de potássio, com a adição de KCl, até atingir o nível de K recomendado por Novais et al. (1991). A adubação silicatada foi feita logo após a semeadura, solubilizando o silicato de potássio em água, e aplicado sobre a superfície do solo.

Os tratamentos fitossanitários realizados durante o experimento estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4. Fungicidas utilizados durante a condução do experimento.

Data	Princípio ativo	Dose	Controle
12/03/2010	Trifloxistrobina + Propiconazol	93,75 + 93,75 i.a./ha	Brusone
24/03/2010	Difenoconazol	0,3 p.c./ha	Brusone
31/03/2010	Mancozebe	4,5 p.c/ha	Brusone

O florescimento dos cultivares ocorreram nos dias 01/04/2010 e 19/04/2010 para o Guarani e BRS Talento respectivamente. A coleta de folha bandeira para diagnose foliar foi realizada dia 07/04/2010 e 28/04/2010 para os cultivares Guarani e BRS Talento respectivamente. Para diagnose foliar foram coletadas 50 folhas bandeiras de cada unidade experimental.

A colheita do experimento foi realizada em dias diferentes, para o cultivar Guarani foi realizada no dia 29/04/2010 e para o cultivar BRS Talento no dia 26/05/2010. As panículas foram deixadas no sol para secarem, após secas, foram trilhadas com a finalidade de separar os grãos da palha.

5.3.3. Avaliações

5.3.3.1. Altura da planta, número de perfilhos por planta, produção de matéria seca, teor e acúmulo de nutrientes na parte aérea

Altura de plantas e número de perfilhos por planta foi realizado como descrito no experimento I. Para determinar teor de nutrientes da parte aérea foram coletadas 50 folhas bandeira ao acaso de cada unidade experimental no período do florescimento, quando 50% das panículas estavam visíveis (RAIJ et al., 1996). O material coletado foi seco em estufa a 60°C até atingir peso constante, seguido de moagem. Em seguida foram determinados o teor de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, B e Al segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997), e Si (KORNDÖRFER, 2004).

Quanto à produção de matéria seca, no momento da colheita após coletar os grãos de todas as plantas do vaso, foram coletadas toda a parte aérea restante de cada parcela para determinação de massa verde da parte aérea (sem os grãos) de cada parcela experimental. A seguir retirou-se subamostras e realizou-se a pesagem. A subamostra foi levada até a estufa com circulação forçada de ar, a 65°C até peso constante.

Posteriormente foi determinada a produção de matéria seca na subamostra e estimada para a massa verde total do vaso, e em seguida estimado para m^2 . A subamostra foi moída e avaliada quimicamente para determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, B e Al, segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997), e Si (KORNDÖRFER, 2004). Os teores obtidos na matéria seca no fim do ciclo da cultura foram utilizados para o cálculo de acúmulo de cada nutriente, estimado a partir da concentração do nutriente presente na amostra, multiplicado pela respectiva massa da matéria seca/1000. O acúmulo total de nutrientes foi estimado em $g\ m^{-2}$.

5.3.3.2. Número de colmos por metro quadrado

Contagem do número de colmos existente em cada unidade experimental, e estimado para metro quadrado no momento da colheita.

5.3.3.3. Porcentagem de colmos férteis

Determinado no momento da colheita, em cada unidade experimental, através da relação: número de panícula na unidade experimental por número de colmos x 100.

5.3.3.4. Número de panículas

Contagem do número de panículas contidas em cada unidade experimental, e estimado para metro quadrado no momento da colheita.

5.3.3.5. Número total de espiguetas por panícula

Contagem do número de espiguetas de 10 panículas por unidade experimental, coletadas no momento da avaliação do número de panícula por unidade experimental.

5.3.3.6. Número de espiguetas granadas e chochas por panícula

Determinada em 10 panículas coletadas ao acaso na parcela experimental. As panículas foram trilhadas manualmente e as espiguetas separadas através do fluxo de ar.

5.3.3.7. Fertilidade das espiguetas

Determinada para cada unidade experimental a partir da relação: número de espiguetas granadas por panículas pelo número total de espiguetas por panícula x 100.

5.3.3.8. Massa de 1000 grãos

Determinada através da coleta ao acaso e da pesagem de oito amostras de 1000 grãos (13% base úmida).

5.3.3.9. Produtividade de grãos

Determinada através da utilização de todas as panículas contidas em cada unidade experimental. As panículas foram separadas manualmente e o material foi limpo, separando palha e os grãos chochos através do fluxo de ar. Em seguida, foi determinado o

peso dos grãos colhidos e calculada a produtividade de grãos e os dados transformados por metro quadrado a 13% de umidade.

5.3.3.10. pH, matéria orgânica, soma de bases, capacidade de troca de cátions, saturação por bases, teores de nutrientes, Si e Al³⁺ do solo após a colheita do experimento

Após a colheita do experimento, foi retirada amostras de solo dos vasos, visando realizar análises de pH, M.O., SB, CTC, V% e P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, B, Al e Si.

5.4. Análise estatística

Os resultados obtidos no Experimento I e II foram submetidos à análise de variância. As médias referentes aos cultivares foram comparadas pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade, enquanto os efeitos das doses de Si avaliados por meio de análise de regressão, adotando-se como critério para escolha do modelo a magnitude dos coeficientes de regressão significativos a 5% de probabilidade pelo teste t.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Experimento I

Os tratamentos com Si não influenciaram o comprimento de raiz (Figura 2A) e área de superfície radicular (Figura 2B). Esperava-se que as raízes das plantas de arroz na presença de Si obtivessem maior desenvolvimento, principalmente com relação a comprimento de raiz, mas não foi o observado. A hipótese era que a planta suprida com Si amenizaria o efeito tóxico do Al^{+3} , com isso o crescimento de raiz não seria inibido, conforme citado por Kochian (1995), como primeiro sintoma da toxidez por Al^{+3} .

Também não houve diferença significativa entre cultivares para estas variáveis (Tabela 5). A hipótese era de que o cultivar Guarani obtivesse maior comprimento de raiz e área de superfície radicular, considerado o fato de ser tolerante ao Al^{+3} tóxico, porém não foi o observado neste trabalho.

Volume de raiz (Figura 2C) não diferiu significativamente com a aplicação de Si, acompanhando os resultados de comprimento e área de superfície radicular (Figura 2A e 2B). Porém, houve diferença entre cultivares para volume radicular (Tabela 5). O cultivar BRS Talento apresentou maior volume radicular mesmo sendo considerado sensível ao Al^{+3} , sendo esta característica de cada cultivar.

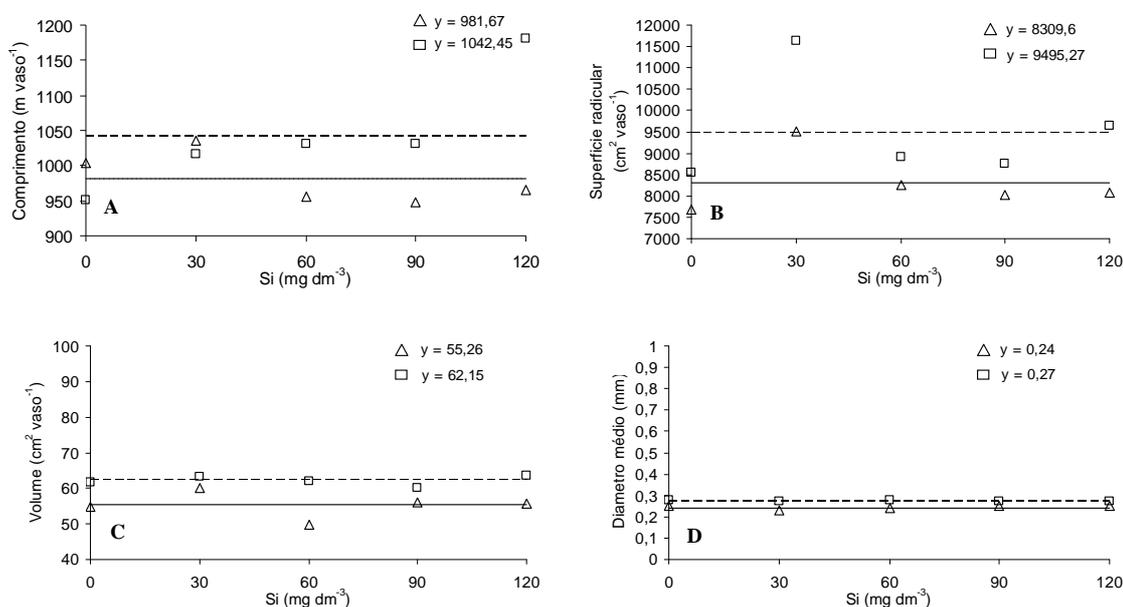


Figura 2. Comprimento (A), Superfície (B), Volume (C) e Diâmetro médio radicular (D) dos cultivares de arroz Guarani (△) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Tabela 5. Média de comprimento de raiz, área de superfície, volume e diâmetro médio em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	Comprimento	Área de	Volume	Diâmetro
	de raiz	superfície		médio
	m vaso ⁻¹	cm ² vaso ⁻¹	cm ³ vaso ⁻¹	mm
Guarani	981,67	8309,56	55,27b	0,24b
BRS Talento	1042,45	9495,27	62,15a	0,27a
CV(%)	22,0	23,8	11,2	11,7

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

Os tratamentos com Si não influenciaram significativamente o diâmetro de raiz (Figura 2D). Outro sintoma da toxidez ao Al⁺³ nas raízes é o engrossamento das mesmas (FOY et al., 1978; TAYLOR, 1988; KOCHIAN, 1995; ROSSIELLO e JACOB NETTO, 2006). Portanto, poderia esperar menor diâmetro em raízes nutridas com Si, devido ao efeito benéfico do Si na amenização da toxidez por Al⁺³, no entanto, não se observou diminuição no engrossamento com a adição de Si na solução nutritiva.

Porém, houve diferença significativa para diâmetro médio radicular (Tabela 5) entre cultivares. O cultivar BRS Talento apresenta maior diâmetro, característica essa devido a sua maior sensibilidade ao Al^{+3} tóxico em comparação com o cultivar Guarani. Isso ocorre, provavelmente, em função das raízes do cultivar sensível quando em contato com o Al^{+3} inibe a expansão celular destas, resultando, posteriormente, no engrossamento do sistema radicular da planta (TAYLOR, 1988).

A altura de plantas (Figura 3A) e número de perfilhos por planta (Figura 3B) não foram influenciados pelo Si na solução nutritiva. Plantas nutridas com Si e sob estresse como a toxicidade ao Al^{+3} , poderiam obter melhor desenvolvimento de raiz, com isso refletindo na parte aérea da planta, em maior crescimento e perfilhamento, mas não foi observado.

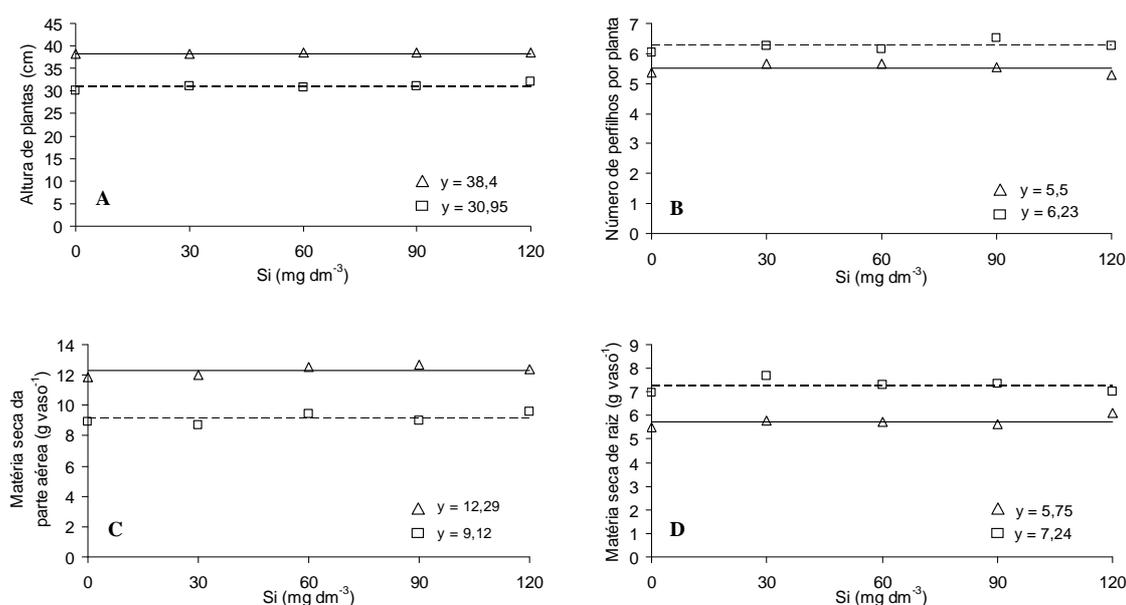


Figura 3. Altura de plantas (A), número de perfilhos por planta (B), matéria seca de parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

Houve diferença significativa entre os cultivares para altura de plantas (Tabela 6), tendo o cultivar Guarani maior altura em comparação ao cultivar BRS Talento, devido a essa variável ser uma característica relacionada à genética da planta. Desta forma, o cultivar Guarani tem maior crescimento com relação ao cultivar BRS Talento, devido ao cultivar pertencer ao grupo tradicional, onde as plantas apresentam altura média. Resultado

semelhante foi obtido por Medeiros (2000) e Carvalho (2009), onde obtiveram maior altura de plantas para o cultivar Primavera, considerado tolerante a estresses, assim como o Guarani.

Tabela 6. Média de altura de plantas, número de perfilhos por planta, matéria seca da parte aérea e matéria seca de raiz em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	Altura de plantas	Número de perfilhos por planta	MS – Parte aérea	MS – Raiz
	cm	n°	-----g vaso ⁻¹ -----	-----
Guarani	38,4a	5,50b	12,29a	5,75b
BRS Talento	30,9b	6,23a	9,12b	7,24a
CV(%)	4,0	6,5	6,3	9,0

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

No número de perfilhos por planta (Tabela 6) houve diferença significativa entre os cultivares. Assim como altura de plantas, a capacidade de perfilhamento é uma característica genética, tendo o cultivar sensível ao Al³⁺ BRS Talento maior número de perfilhos que em comparação ao cultivar tolerante ao Al³⁺ Guarani. As plantas do cultivar BRS Talento pertencente ao grupo das modernas e de alto rendimento de grãos, apresentam estatura baixa, folhas curtas e eretas e elevado perfilhamento (EMBRAPA, 2011).

Os tratamentos não influenciaram a produção de matéria seca da parte aérea (Figura 3C) e de raiz dos cultivares de arroz (Figura 3D). A produção de matéria seca é um ótimo indicativo para demonstrar a tolerância da planta ao Al³⁺. Devido ao Al³⁺ quando em contato com a raiz inibe seu crescimento (KOCHIAN, 1995), consecutivamente diminui produção de matéria seca de raiz e em seguida da parte aérea. Esse resultado é diferente ao obtido por Rahman et al. (1998), onde testando o Si na amenização da toxidez por Al³⁺ em plantas de arroz, obteve resposta positiva, porém, o Si foi aplicado junto com o Al³⁺ na solução nutritiva, onde houve interação entre os íons em solução.

Os resultados obtidos por este experimento também foram diferentes dos obtidos por Gu et al. (1998) e Ma et al. (1997) para milho, Hammond et al. (1995) para cevada, Baylis et al. (1994) para soja, Galvez et al. (1987), Galvez e Clark (1991), Hodson e Sangster (1993) para sorgo e Li et al. (1989) para algodão, todos obtendo efeito do Si na

amenização do Al^{+3} tóxico, porém, esse efeito se deu principalmente na solução do solo ou nutritiva, na interação entre o íon Al^{+3} e Si, diminuindo a disponibilidade de Al^{+3} para a planta.

Hara et al. (1999), citaram que o Si ao atuar na amenização da toxidez ao Al^{+3} em plantas de arroz, contribuíram não somente ao decréscimo da concentração de Al^{+3} na solução nutritiva, mas também na mudança de forma química do Al^{+3} na solução nutritiva e na planta, diminuindo a absorção de Al^{+3} pelas mesmas. Citam que com a aplicação de Si o Al^{+3} se transformaram nas formas $\text{Al}(\text{OSi}(\text{OH})_3)^{2+}$ e $\text{Al}_p\text{-(OH)}_r(\text{OSi}(\text{OH})_3)_q$, forma estas menos tóxicas as plantas de arroz.

Vale ressaltar que para o presente experimento o Si foi aplicado primeiro em solução nutritiva, posteriormente retirado da solução e adicionado o Al^{+3} . Dessa forma não houve interação entre Si e Al^{+3} na solução nutritiva.

Houve diferença significativa para produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 6) entre os cultivares, embora o cultivar BRS talento perfilhou mais, porém, o cultivar Guarani obteve plantas com altura superior (Tabela 6), contribuindo para a maior produção de matéria seca em comparação ao cultivar BRS Talento.

Para a variável produção de matéria seca de raiz, também houve diferença significativa (Tabela 6). Porém o cultivar sensível ao Al^{+3} , BRS Talento, obteve maior produção em comparação ao Guarani. Com isso, houve maior desenvolvimento de raiz do cultivar sensível ao Al^{+3} BRS Talento em comparação ao tolerante, principalmente devido à obtenção de maior produção de matéria seca de raiz (Tabela 6) e maior volume radicular (Tabela 5). Raízes mais grossas (Tabela 5) também podem ter contribuído para a maior produção de matéria seca do cultivar BRS Talento.

O teor e acúmulo de N (Figura 4A e 4C) da parte aérea não foram influenciados com a aplicação de Si. Esperava-se que o Si promovesse efeito positivo na amenização da toxidez ao Al^{+3} , onde as raízes das plantas na presença de Si tivessem maior desenvolvimento, fazendo com que as plantas absorvessem maior quantidade de nutrientes, devido ao maior crescimento radicular.

Porém, o teor e acúmulo de N da raiz (Figura 4B e 4D) sofreram influencia significativa somente no cultivar BRS Talento, onde o aumento das concentrações de Si promoveu acréscimo no teor de N. O maior acúmulo de N na raiz na presença de Si

(Figura 4D), não foi suficiente para aumentar o acúmulo de N na parte aérea do cultivar BRS Talento (Figura 4C).

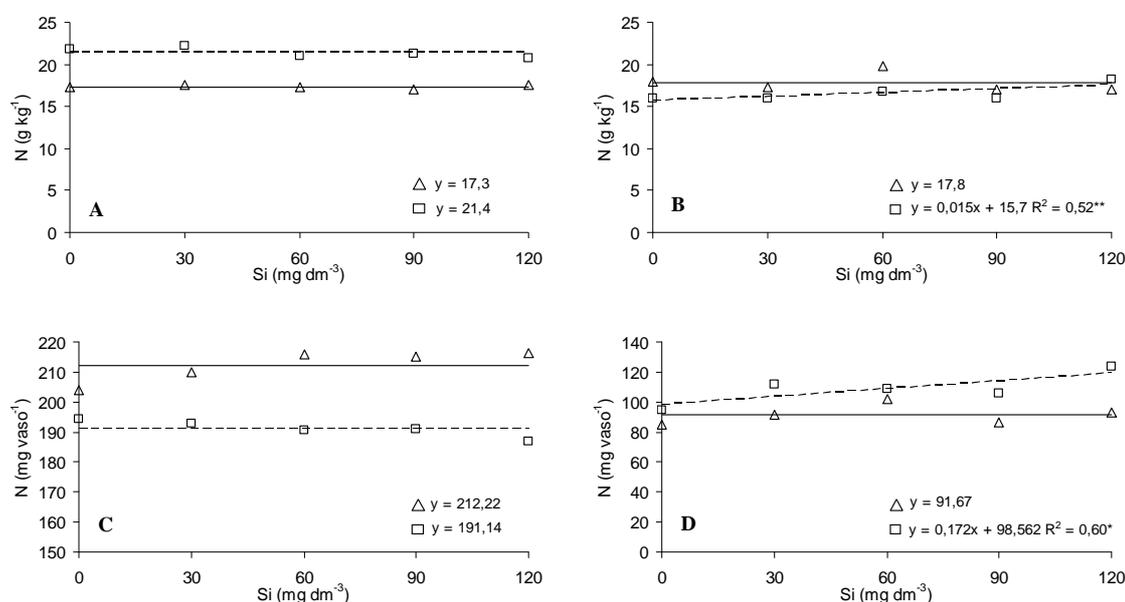


Figura 4. Teor de nitrogênio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de nitrogênio na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

É interessante citar que mesmo com a interação negativa entre Si e N, onde o H_3SiO_4 e o NO_3^- concorrem pelo mesmo sítio de absorção (WALLACE et al., 1976; WALLACE, 1989), o que poderia diminuir o teor de Si ou N na parte aérea, foi observado que ao aumentar as doses de Si, o teor de N nas raízes foi crescente. Isso pode ter ocorrido devido ao arroz no início de seu desenvolvimento não ser eficiente na absorção de NO_3^- , onde absorve o N na forma de NH_4^+ (WANG et al., 1993), este que não tem interação com o Si. Então, pode ser que o Si tenha influenciado na forma de N da solução nutritiva, talvez, favorecendo a absorção de NH_4^+ no início de seu desenvolvimento, quando ainda não absorve nitrato eficientemente.

Na avaliação do teor de N na parte aérea houve diferença significativa entre os cultivares (Tabela 7), evidenciando maior teor de N no cultivar sensível ao Al^{+3} , sendo essa uma característica genética da planta (VAHL, 1991), demonstrando que o cultivar BRS Talento é eficiente na utilização e translocação de N para a parte aérea, já que obteve

menor teor de N na raiz (Tabela 8), e maior na parte aérea (Tabela 7). Também pode ter ocorrido efeito diluição, pois o cultivar Guarani apresentou maior massa seca.

Tabela 7. Média do teor na parte aérea de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e Si em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg ⁻¹ -----					
Guarani	17,30b	0,66	16,65a	4,00	1,39a	2,45
BRS Talento	21,40a	0,70	15,05b	4,05	1,15b	2,28
CV(%)	5,0	10,7	10,5	15,8	8,2	11,0
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----mg kg ⁻¹ -----					g kg ⁻¹
Guarani	17,80	11,90	312,85a	332,80a	56,50a	16,75b
BRS Talento	16,90	11,10	288,00b	246,00b	39,55b	23,04a
CV(%)	15,9	13,8	12,4	11,6	14,1	8,8

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

Tabela 8. Média do teor na raiz de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e Si em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg ⁻¹ -----					
Guarani	17,80a	0,65a	15,80a	0,51	0,62b	2,31a
BRS Talento	16,60b	0,61b	13,45b	0,50	0,69a	2,22b
CV(%)	5,0	6,9	6,0	34,9	5,8	4,7
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----mg kg ⁻¹ -----					g kg ⁻¹
Guarani	26,35a	33,75	58,75b	1612,00a	79,50a	13,25
BRS Talento	21,50b	34,00	68,65a	957,65b	48,25b	13,45
CV(%)	16,8	9,8	9,2	14,5	12,2	14,9

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

Houve diferença significativa entre os cultivares quanto ao acúmulo de N na parte aérea (Tabela 9) e raiz (Tabela 10). O acúmulo de N na parte aérea foi maior no cultivar Guarani, mesmo com o teor de N (Tabela 7) sendo maior no cultivar BRS Talento. Isso ocorreu devido ao cultivar Guarani ter apresentado maior produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 6) em comparação ao BRS Talento. Levando a acreditar que com a maior produção de matéria seca da parte aérea do cultivar, houve maior acúmulo de N.

Já com relação à raiz (Tabela 10), ocorreu o inverso, o acúmulo de N na raiz foi maior para o cultivar BRS Talento, enquanto o teor N (Tabela 8) foi maior no cultivar Guarani. Porém, para o BRS Talento a produção de matéria seca de raiz foi maior (Tabela 6), com isso pode se dizer que com maior produção de matéria seca houve maior absorção de N pela raiz, obtendo maior acúmulo.

Tabela 9. Média do acúmulo na parte aérea de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e Si em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----mg vaso ⁻¹ -----					
Guarani	212,22a	8,16a	137,77	46,77a	17,15a	30,0a
BRS Talento	191,14b	6,30b	203,82	36,13b	10,78b	20,9b
CV(%)	6,8	11,4	10,6	12,4	11,3	10,4
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----μ vaso ⁻¹ -----					mg vaso ⁻¹
Guarani	217,3a	146,0a	3837,8a	4088,8a	694,1a	206,3
BRS Talento	158,9b	102,2b	2652,5b	2354,8b	372,7b	210,2
CV(%)	16,6	14,8	11,5	15,0	14,9	9,8

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

O teor e acúmulo de fósforo (P) na parte aérea (Figura 5A e 5C) não foram influenciados pelos tratamentos empregados. Não era esperado que doses de Si promovesse aumento do teor e acúmulo de P, sendo que o maior efeito benéfico do Si sobre o P é na redução da adsorção do P no solo, mas, com o experimento realizado em solução nutritiva não haveria possibilidade para esse efeito, já que não há colóides minerais na solução

nutritiva, consecutivamente, não há adsorção de P nem de Si (OBIHARA e RUSSEL, 1972; OLIVEIRA, 1984; LEITE, 1997; CARVALHO et al., 2001), com isso o P esta livre na solução e o Si não influencia diretamente o íon fosfato.

Tabela 10. Média do acúmulo na raiz de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e Si em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----mg vaso ⁻¹ -----					
Guarani	91,6b	3,3b	80,9	2,6	3,2b	11,8b
BRS Talento	108,8a	3,8a	86,8	3,2	4,4a	14,4a
CV(%)	13,4	12,4	12,8	36,5	12,1	10,3
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----μ vaso ⁻¹ -----					mg vaso ⁻¹
Guarani	134,7	172,8b	300,4b	8191,6a	404,3a	67,5b
BRS Talento	137,6	218,87a	439,6a	6191,3b	309,8b	87,0a
CV(%)	16,8	11,7	12,0	13,5	11,9	17,7

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

Em relação ao acúmulo de P na raiz o Si influenciou apenas o cultivar BRS Talento (Figura 5D). O acúmulo cresce inicialmente até 4,27 mg vaso⁻¹, posteriormente decresce. É importante citar que o teor de P na raiz não foi influenciado pelo Si (Figura 5B), no entanto influenciou o acúmulo.

Não houve diferença significativa entre os cultivares para teor de P na parte aérea (Tabela 7). O acúmulo de P na parte aérea foi maior para o cultivar Guarani em comparação ao BRS Talento (Tabela 9). Em compensação o acúmulo de P na raiz (Tabela 10) do cultivar BRS Talento foi maior em comparação ao Guarani, tendo comportamento inverso ao teor de P na raiz (Tabela 8), onde o cultivar Guarani apresentou teor superior de P. Isso pode ser explicado devido ao cultivar BRS Talento ter obtido maior produção de matéria seca de raiz (Tabela 6) e volume radicular (Tabela 5), dessa forma, absorvendo e acumulando maior quantidade de P. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Sivaguru e

Paliwal (1993), onde citam que cultivares de arroz tolerantes ao Al^{3+} apresentam teores de P mais elevados do que as cultivares sensíveis.

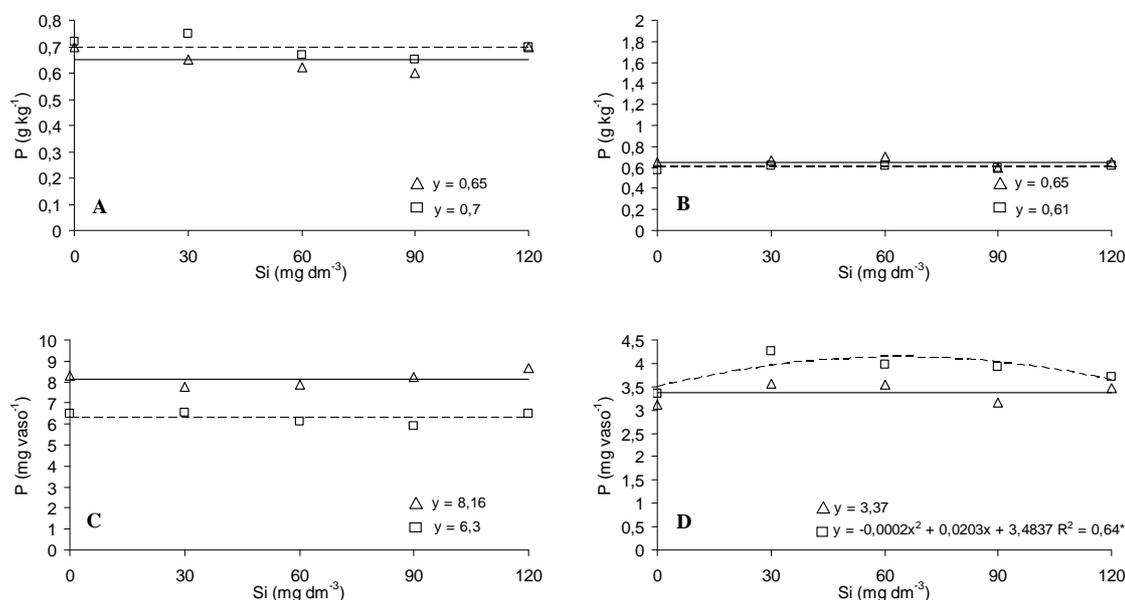


Figura 5. Teor de fósforo na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de fósforo na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Os tratamentos não influenciaram de forma significativa o teor e acúmulo de K na parte aérea (Figura 6A e 6C). No entanto, como aconteceu para o acúmulo de P (Figura 5D), o Si influenciou o acúmulo de K na raiz somente para o cultivar BRS Talento (Figura 6D). Inicialmente houve aumento de K na presença de Si até 95 mg vaso⁻¹, posteriormente o acúmulo diminuiu caracterizando comportamento quadrático.

O teor de K da parte aérea (Tabela 7) diferiu significativamente entre os cultivares. Isso se dá principalmente pela característica genética do cultivar (FURLANI et al., 1986), onde o cultivar Guarani tolerante ao Al^{3+} , obteve maior teor de K. Nas raízes (Tabela 8) houve o mesmo efeito da parte aérea, tendo o cultivar Guarani com maior teor de K de que o cultivar BRS Talento.

Não houve diferença significativa entre os cultivares para o acúmulo de K na parte aérea (Tabela 9) e raiz (Tabela 10). Resultado este que é diferente do teor de K na parte aérea (Tabela 7) e raiz (Tabela 8), já que para estes o teor de K foi maior no cultivar Guarani. Teores estes que estão de acordo aos obtidos por Mendonça et al. (2003), que

avaliando em solução nutritiva dois cultivares de arroz e observaram que o cultivar tolerante a toxidez de Al^{+3} apresentou maior eficiência de utilização de K em comparação com o cultivar sensível.

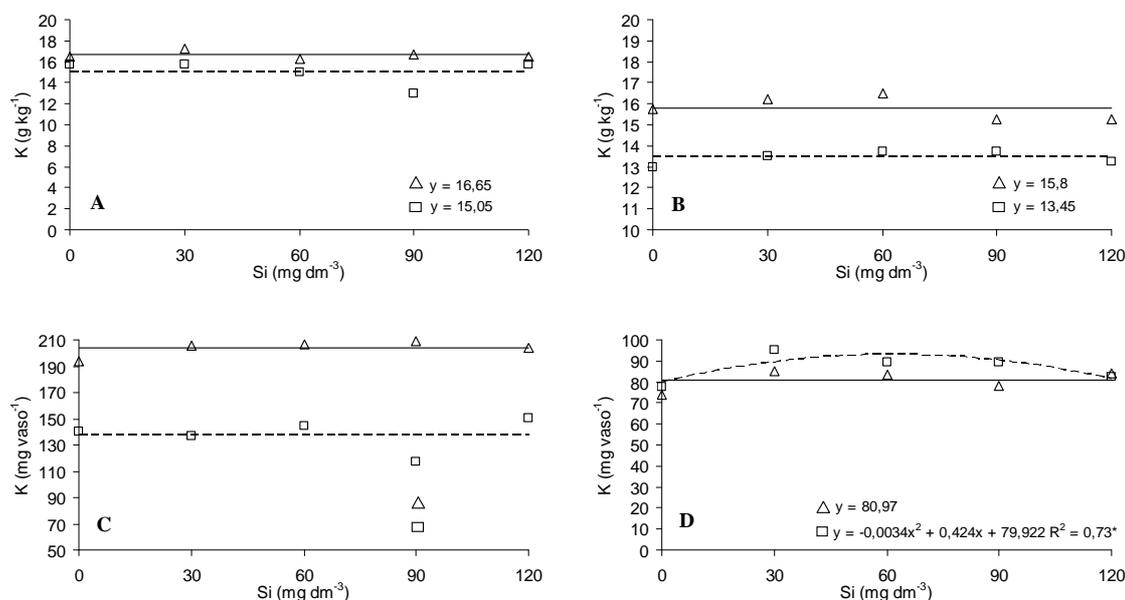


Figura 6. Teor de potássio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de potássio na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

A aplicação de Si influenciou significativamente o teor e acúmulo de cálcio (Ca) na parte aérea (Figura 7A) somente no cultivar BRS Talento, onde com o aumento das concentrações de Si, observou-se decréscimo no teor de Ca da parte aérea. Contudo esse decréscimo não influenciou a produção de matéria seca da parte aérea (Figura 3C). Mesmo para os menores teores observados de Ca na parte aérea (Figura 7A), que encontravam-se dentro da faixa adequada de Ca segundo Fageria (1984a).

Ao contrário do efeito obtido na parte aérea (Figura 7A), nas raízes a aplicação de Si não influenciou o cultivar BRS Talento (Figura 7B). Possivelmente, o Si tenha influenciado o Ca na translocação da planta, ou seja, onde havia Si na solução nutritiva ocorreu menor translocação de Ca da raiz para parte aérea.

O decréscimo de Ca pode ser um fato que evidencia a não participação do Si na tolerância de plantas ao Al^{+3} . Segundo Oliveira e Oliveira (2009), altos teores de cálcio em plantas promovem maior resistência à toxidez do Al^{3+} . O Ca^{2+} faz parte do pectato

de Ca, tendo como principal função manter a parede celular íntegra, atuando na seletividade do transporte de íons, protegendo-a dos efeitos deletérios provocados por íons de hidrogênio e Al^{+3} , que prejudicam as funções da membrana (BENINNI et al., 2003) e é de extrema importância no crescimento e aprofundamento das raízes (VITTI et al., 2006).

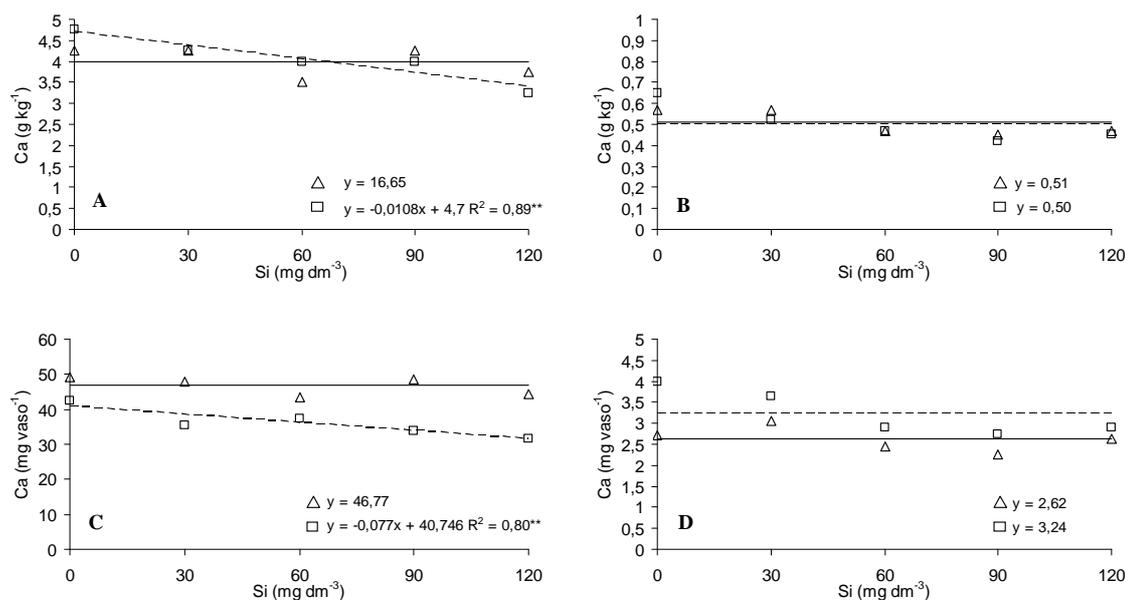


Figura 7. Teor de cálcio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de cálcio na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Se faltar Ca, o plasmalema, ou seja, a parte interna da membrana celular perde sua semipermeabilidade, devido ao aumento na atividade da enzima polygalacturonase promovendo a degradação dos pectatos, tornando-a permeável, ou “furada”, permitindo a entrada de íons, nutritivos ou não, conforme sua quantidade no solo. A raiz perde sua seletividade, levando a transtornos fisiológicos muito sérios à planta (MARSCHNER, 1995).

No entanto, não houve diferença significativa na comparação entre os dois cultivares para o teor de Ca na parte aérea e raiz das plantas (Tabela 7 e 8). Observou-se diferença significativa para o acúmulo de Ca na parte aérea (Tabela 9). Com o cultivar Guarani apresentando maior acúmulo em comparação ao cultivar BRS Talento, isso pode ter ocorrido devido a maior produção de matéria seca da parte aérea do cultivar Guarani, acumulando maior quantidade de Ca na parte aérea. Os resultados estão de acordo com os

obtidos por Sivaguru e Paliwal (1993) e Mendonça et al. (2003), onde citam que cultivares de arroz tolerantes ao Al^{3+} apresentam teores de Ca mais elevados do que as cultivares sensíveis.

Com relação ao acúmulo de Ca na raiz (Tabela 10), não houve diferença entre os cultivares, o que mostra que o cultivar Guarani é eficiente no transporte de Ca, por acumular maior quantidade de Ca na parte aérea.

Ao contrário do que ocorreu com o teor de Ca, o teor de magnésio (Mg) na parte aérea (Figura 8A) foi influenciado pela aplicação de Si somente para cultivar Guarani, tendo redução no teor de Mg conforme se aumentaram as doses de Si. Porém, semelhante ao ocorrido para o Ca no cultivar BRS Talento, o decréscimo de Mg no cultivar Guarani não influenciou negativamente a produção de matéria seca da parte aérea das plantas (Figura 3C). Já o cultivar BRS talento não foi influenciado pela aplicação de Si para o teor de Mg na parte aérea nas plantas de arroz (Figura 8A).

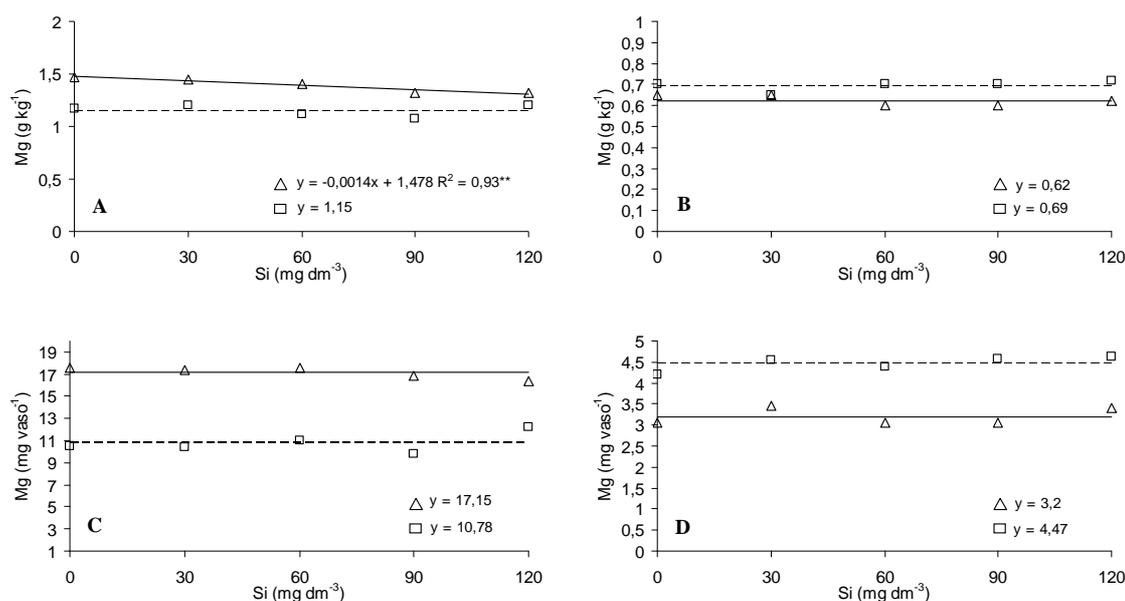


Figura 8. Teor de magnésio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de magnésio na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

No entanto, o teor de Mg na raiz (Figura 8B) não diferiu significativamente com a aplicação de Si, levando a crer que o comportamento decrescente do teor de Mg na parte aérea (Figura 8A) da planta é decorrente da influencia do Si na

translocação de Mg para parte aérea, já que na raiz o teor de Mg não foi influenciado e na parte aérea houve decréscimo na presença de Si.

O acúmulo de Mg na parte aérea (Figura 8C) e raiz (Figura 8D) não foram influenciados pelo Si em solução nutritiva. O que confirma a não influência do decréscimo do teor de Mg na produção de matéria seca da parte aérea.

Houve diferença significativa para teor de Mg na parte aérea entre os cultivares de arroz (Tabela 7), tendo o cultivar Guarani com maior teor de Mg em comparação ao BRS Talento. Na raiz também houve diferença significativa entre os cultivares (Tabela 8), mas, com o teor de Mg do BRS Talento superior ao Guarani. Isso se deu provavelmente à maior capacidade de translocação de Mg do cultivar Guarani, já que obteve menor teor de Mg na raiz em comparação ao BRS Talento, mas na parte aérea obteve concentrações superiores. O comportamento do Mg foi semelhante ao do K (Tabela 7). Os dois cátions tiveram maior teor na parte aérea no cultivar Guarani, considerado tolerante ao Al^{3+} . Estes dados estão de acordo com os resultados obtidos por Mendonça et al. (2003), que trabalhando com dois cultivares de arroz, observaram que o cultivar tolerante a toxidez de Al^{3+} apresentou maior eficiência de utilização de K e Mg em comparação com o cultivar sensível.

Quanto ao acúmulo de Mg na parte aérea (Tabela 9) e raiz (Tabela 10), ao comparar os dois cultivares houve diferença significativa. O cultivar Guarani tem maior acúmulo de Mg na parte aérea em comparação ao BRS Talento, devido sua maior produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 6). Na raiz ocorre o inverso, o cultivar BRS Talento apresentou maior acúmulo de Mg em comparação ao cultivar Guarani tolerante ao Al^{3+} , acompanhando a maior produção de matéria seca de raiz pelo cultivar BRS Talento (Tabela 6).

Com relação ao teor e acúmulo de enxofre (S) na parte aérea das plantas de arroz (Figura 9A), os tratamentos com Si não promoveram efeito significativo. O que já era esperado, devido ao Si não influenciar na absorção de S, e também devido ao não aumento na matéria seca de raiz pelo Si.

O teor de S na raiz (Figura 9B), com a aplicação de Si houve um aumento inicial até $15,52 \text{ mg vaso}^{-1}$, posteriormente ocorrendo decréscimo em seu teor, caracterizando uma equação quadrática. Também houve efeito similar para acúmulo de S na raiz do cultivar BRS Talento (Figura 9D). No entanto, o Si não influenciou o acúmulo de S na raiz para o cultivar Guarani. Isso pode ter ocorrido, pois há interação entre Ca e S, e onde

houve menor teor de Ca na planta (Figura 7A), pode ter afetado a absorção de S (VENTURIN et al., 1999).

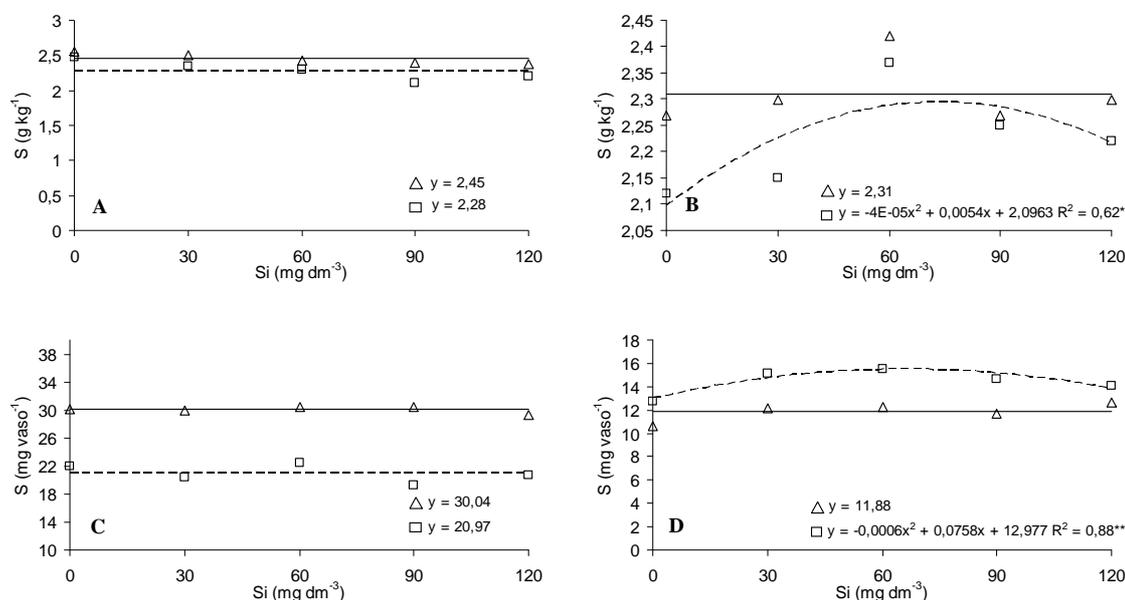


Figura 9. Teor de enxofre na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de enxofre na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

Ao comparar os cultivares, não houve diferença significativa para o teor de S na parte aérea (Tabela 7). Porém, os teores de S da raiz foram diferentes significativamente (Tabela 8), com o cultivar Guarani apresentando maior teor. Também houve diferença significativa quanto ao acúmulo de S, observando que o cultivar BRS Talento apresentou maior acúmulo de S na raiz (Tabela 10). Provavelmente devido ao maior desenvolvimento da raiz do cultivar BRS Talento (Tabela 5 e 6). Já para o acúmulo de S na parte aérea (Tabela 9), o cultivar Guarani obteve maior acúmulo, devido a sua maior produção de matéria seca de raiz (Tabela 6).

O Si adicionado influenciou somente o cultivar BRS Talento para o teor de boro (B) na parte aérea das plantas (Figura 10A), obtendo comportamento decrescente quando na presença de Si. Embora, mesmo com o decréscimo do teor de B, este não contribuiu para o decréscimo na produção de matéria seca da parte aérea (Figura 3C), já que mesmo diminuindo o teor desse micronutriente, este ainda se encontrava na faixa adequada para o arroz de acordo com Fageria (1984a). Por outro lado, a aplicação de Si não influenciou

o cultivar Guarani, provavelmente por esta ser uma característica genética da planta (VAHL, 1991), onde o cultivar BRS Talento na presença de Si tem menores teores de B.

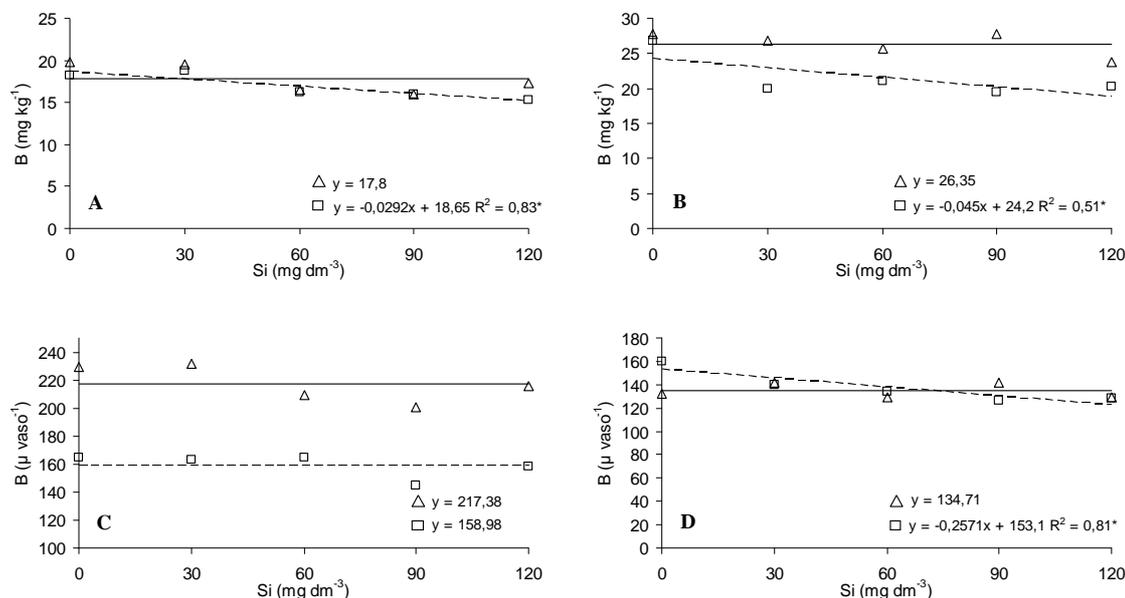


Figura 10. Teor de boro na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de boro na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

Quanto ao teor de B nas raízes em função de doses de Si (Figura 10B), também obteve-se diferença significativa somente para o cultivar BRS Talento. Observou-se que na presença de Si a planta tem menor teor de B na raiz. Segundo Marschner (1995) é possível que devido as similaridades químicas do ácido silícico e do ácido bórico em solução e o fato de que o B juntamente com o Ca, participa da síntese e estruturação da parede celular das células e que ambos apresentam demanda inversamente proporcional à capacidade de absorver Si, quando comparadas espécies de monocotiledôneas com dicotiledôneas.

Outra hipótese foi a levantada por Gunes et al. (2007), onde cita que o Si pode reduzir a toxidez por B, embora não seja o caso de toxidez, pode ser que o Si diminuiu a disponibilidade de B, diminuindo seu teor na raiz e parte aérea.

Para o acúmulo de B na parte aérea o Si não influenciou de forma significativa as plantas (Figura 10C), o que mostra que mesmo com o decréscimo do teor de B na parte aérea ao passo que se aumenta o nível de Si na solução nutritiva, não influenciou no acúmulo final de B na parte aérea. Porém, o Si influenciou tanto o teor (Figura 10B) quanto o

acúmulo de B na raiz do cultivar BRS Talento (Figura 10D), pois observou-se que quanto maior o nível de Si na solução menor o acúmulo de B na raiz.

Não houve diferença significativa entre cultivares quanto ao teor de B na parte aérea (Tabela 7). Porém, houve diferença significativa para o teor de B nas raízes das plantas (Tabela 8), demonstrando que o cultivar Guarani tem teor de B superior ao do BRS Talento.

Na parte aérea houve diferença significativa para o acúmulo de B (Tabela 9), com o cultivar Guarani obtendo valores superiores ao comparar com o BRS Talento, devido a sua maior produção de matéria seca de parte aérea (Tabela 6). Com relação ao acúmulo de B na raiz (Tabela 10), mesmo com a maior produção de matéria seca de raiz do cultivar BRS Talento (Tabela 6), não houve diferença significativa entre os cultivares.

Com relação ao teor de Cu na parte aérea, as doses de Si afetaram significativamente o cultivar BRS Talento (Figura 11A), mas de forma negativa, entretanto o decréscimo desse micronutriente não contribuiu para um possível decréscimo na produção de matéria seca da parte aérea (Figura 3C). Segundo Fageria (1984a), o teor de Cu mesmo com o decréscimo, continuou na faixa adequada para o nutriente. Na presença de Si o teor de Cu na raiz não é influenciado (Figura 11B), porém, pode ser que o Si influencie a translocação de Cu para parte aérea, pois quando na presença de Si o teor de Cu da parte aérea tem comportamento decrescente (Figura 11A). Por outro lado, o cultivar Guarani não foi influenciado com a aplicação de Si para o teor de Cu. E, o acúmulo de Cu na parte aérea (Figura 11C) e na raiz (Figura 11D) dos cultivares de arroz também não foram influenciados pela aplicação de Si.

Comparando os dois cultivares quanto ao teor de Cu na parte aérea (Tabela 7) e raiz (Tabela 8), não houve diferença significativa para essa variável. Porém, houve efeito significativo para o acúmulo de Cu na parte aérea (Tabela 9) e raiz (Tabela 10). O acúmulo de Cu na parte aérea apresentou comportamento semelhante a maior produção de matéria seca (Tabela 6), com o cultivar Guarani apresentando maior acúmulo de Cu. Com relação ao acúmulo de Cu na raiz, houve o mesmo comportamento, o cultivar BRS Talento apresentou maior acúmulo de Cu devido a sua maior produção de matéria seca de raiz (Tabela 6).

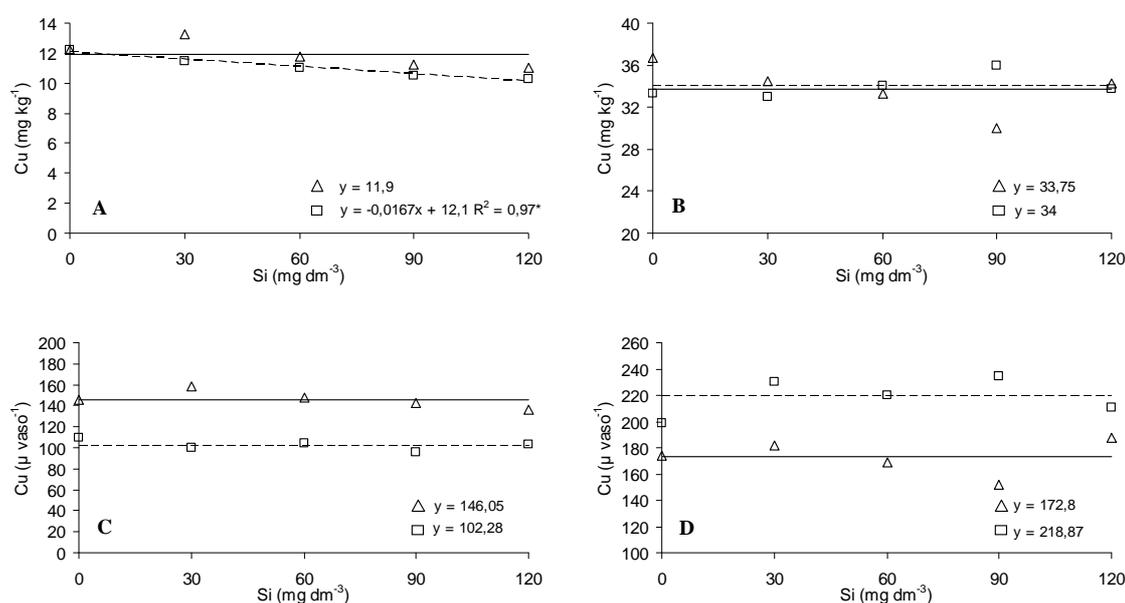


Figura 11. Teor de cobre na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de cobre na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

Semelhante ao observado para o B e Cu, o teor de ferro (Fe) na parte aérea (Figura 12A) obteve o mesmo comportamento, sendo somente o cultivar BRS Talento influenciado pela aplicação de Si. O teor de Fe foi decrescente conforme se aumentou o nível de Si na solução nutritiva. Como ocorreu para o Cu (Figura 11B), o teor de Fe na raiz não foi alterado com a aplicação de Si (Figura 12B). A principal explicação para o decréscimo de Fe na parte aérea (Figura 12A) é o fato de o Si participar na amenização na toxidez por Fe (BARBOSA FILHO, 1987; TAKAHASHI, 1995; SAVANT et al., 1997), diminuindo o teor de Fe da parte aérea com o aumento da concentração do Si. Nas condições do experimento não foi o caso de ocorrer toxidez por Fe, porém, pode ter ocorrido a diminuição no teor de Fe devido a essa interação com o Si. No entanto, mesmo com o decréscimo de Fe na parte aérea, o teor ainda é considerado ideal para a cultura do arroz segundo Fageria (1984a).

Com relação ao acúmulo de Fe na parte aérea (Figura 12C) e na raiz, (Figura 12D) a aplicação de Si não gerou nenhuma influencia significativa. Para a parte aérea o acúmulo de Fe apresenta comportamento inverso ao observado no teor de Fe da parte aérea (Figura 12A), onde conforme aumentou-se o nível de Si em solução nutritiva houve redução do teor de Fe. O efeito em teor não foi suficiente para fazer com que o acúmulo de Fe na parte

aérea fosse influenciado. Já para o acúmulo de Fe na raiz, o comportamento assemelha-se ao observado no teor de Fe na raiz (Figura 12B).

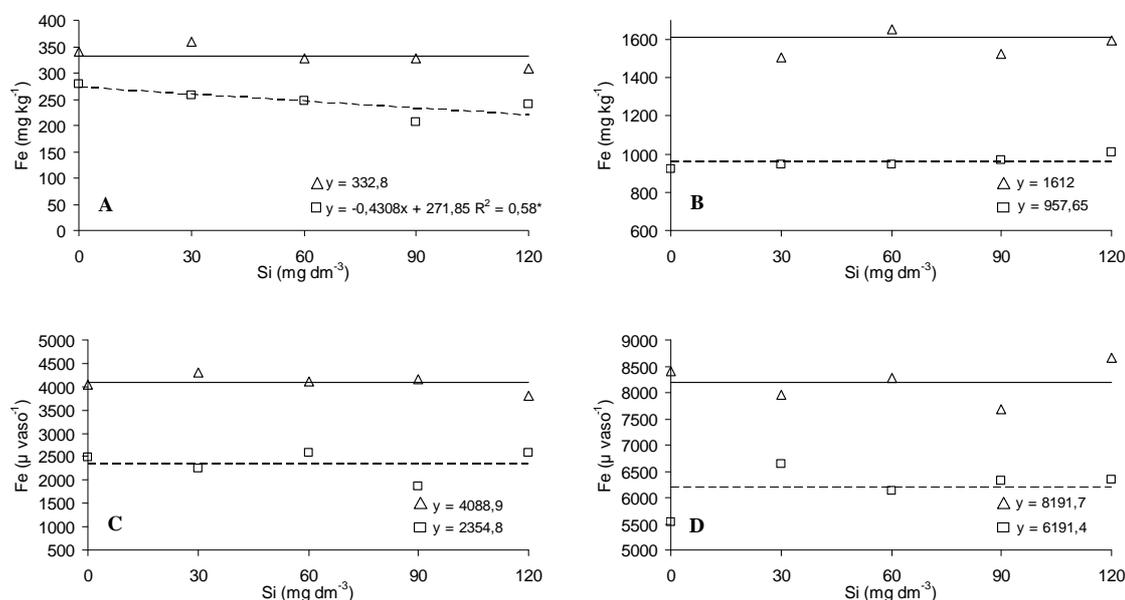


Figura 12. Teor de ferro na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de ferro na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Houve diferença significativa entre cultivares quanto ao teor de Fe na parte aérea (Tabela 7) e raiz (Tabela 8), sendo que o cultivar tolerante ao Al⁺³ apresentou o maior teor de Fe em comparação ao cultivar BRS Talento, sensível ao Al⁺³.

Também, houve diferença significativa ao comparar os cultivares quanto ao acúmulo de Fe na parte aérea (Tabela 9) e raiz (Tabela 10). O cultivar Guarani obteve maior acúmulo de Fe na parte aérea, devido sua maior produção de matéria seca de parte aérea (Tabela 6). E, o cultivar Guarani apresentou maior acúmulo de Fe na raiz em comparação ao BRS Talento, apesar de o cultivar Guarani ter produzido menor quantidade de matéria seca de raiz em comparação ao cultivar BRS Talento. Fato este decorrente da característica genética do cultivar (VAHL, 1991), fazendo com que a raiz absorva maior quantidade de Fe.

O teor de manganês (Mn) da parte aérea (Figura 13A) foi influenciado significativamente pelo Si na solução nutritiva somente para o cultivar BRS Talento. Os resultados estão de acordo com os obtidos por Vermas e Minhas (1989) que observaram

diminuições dos teores de Mn na parte aérea de plantas de arroz cultivadas em meio com Si. No entanto o cultivar Guarani não foi influenciado pela aplicação de Si quanto ao teor de Mn, evidenciando assim uma diferença genética entre os cultivares, quanto aos teores de Mn (VAHL, 1991).

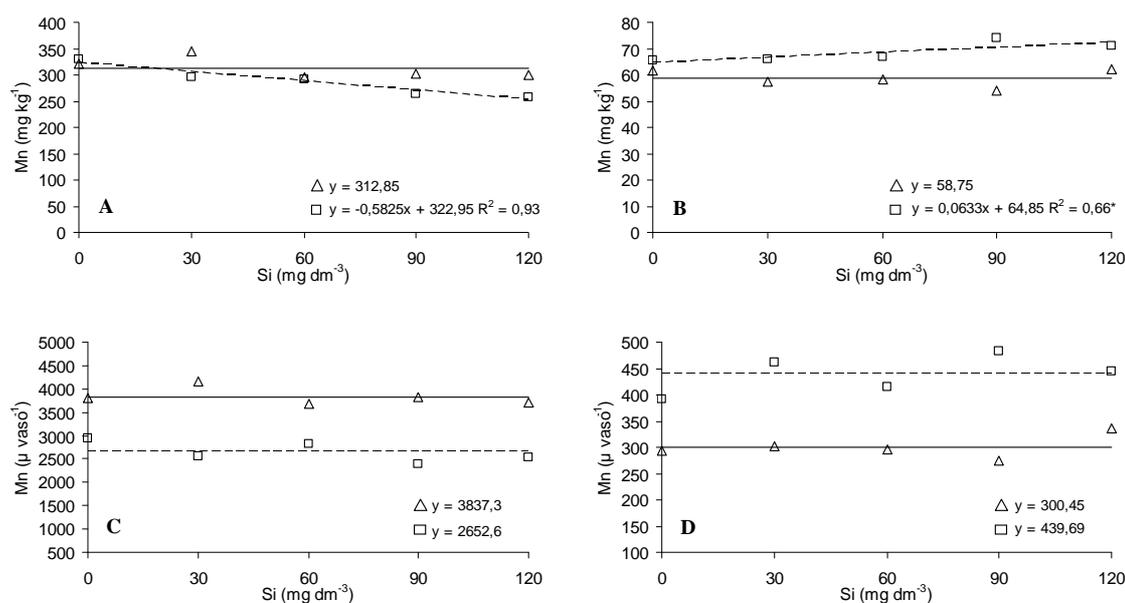


Figura 13. Teor de manganês na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de manganês na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

Em contrapartida ao comportamento decrescente no teor de Mn na parte aérea do cultivar BRS Talento com a aplicação de Si, o teor de Mn na raiz obteve comportamento crescente com a aplicação de Si (Figura 13B), ou seja, comportamento inverso em comparação ao comportamento do teor de Mn da parte aérea (Figura 13A). Isso se deve a ação do Si na toxidez ao Mn pelas plantas (GALVEZ et al., 1987). Não é o caso, porém, mesmo com o crescente teor de Mn na raiz (Figura 13B), o Si fez com que o Mn não fosse transportado para a parte aérea ou deixando o Mn em formas não aproveitáveis pela planta, diminuindo o teor de Mn na parte aérea da planta conforme se aumentou os níveis de Si na solução nutritiva (Figura 13A), e consecutivamente, aumentando os níveis de Mn na raiz.

Os tratamentos não influenciaram de forma significativa o acúmulo de Mn na parte aérea (Figura 13C) e raiz (Figura 13D) dos cultivares de arroz. O que mostra que

o acúmulo final de Mn tanto na parte aérea quanto na raiz não foi alterado, mesmo com o teor sendo alterado pela aplicação de Si.

Também, houve diferença significativa entre os cultivares quanto ao teor de Mn na parte aérea das plantas (Tabela 7) e raiz (Tabela 8). O cultivar BRS Talento tem maior teor de Mn na raiz em comparação ao Guarani. Porém, o cultivar Guarani tem maior teor de Mn na parte aérea.

O acúmulo de Mn tanto na parte aérea (Tabela 9) quanto na raiz (Tabela 10) promoveram efeito significativo quando comparados os dois cultivares. O cultivar Guarani acumulou maior quantidade de Mn na parte aérea devido sua maior produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 6), enquanto o cultivar BRS Talento obteve acúmulo superior de Mn na raiz em comparação ao cultivar Guarani, devido a maior produção de matéria seca da raiz do cultivar BRS Talento (Tabela 6).

O teor e acúmulo de Zn da parte aérea (Figura 14A e C) não foram alterados significativamente pelas doses aplicadas de Si. Sendo o Zn, o único micronutriente que não foi influenciado de forma negativa para o cultivar BRS Talento. No entanto, o teor de Zn da raiz dos dois cultivares foram influenciados de forma negativa pela aplicação de Si, apresentando comportamento linear decrescente.

O Si influenciou de forma negativa o acúmulo de Zn na raiz dos dois cultivares (Figura 14D). Essa resposta se dá, devido ao Si ter influenciado na absorção de Zn, reduzindo o acúmulo de Zn na raiz. Esse comportamento não foi verificado na parte aérea, confirmando o efeito do Si na diminuição de absorção de Zn na presença de Al^{+3} , porém, não influenciando na diminuição do teor e acúmulo de Zn na parte aérea das plantas. Carvalho (2000) e Pereira et al. (2003) também observaram redução no teor de zinco com o aumento das doses de Si aplicados na cultura do arroz e tomate, respectivamente.

Os cultivares diferiram significativamente entre si quanto ao teor de Zn na parte aérea (Tabela 7) e raiz (Tabela 8), fato esse que pode ser explicado por diferença na característica genéticas dos cultivares, ou seja, o cultivar Guarani obter maiores teores de Zn, do que o BRS Talento.

Comparando os dois cultivares para o acúmulo de Zn na parte aérea (Tabela 9) e raiz (Tabela 10), observa-se que o acúmulo de Zn na parte aérea acompanhou a produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 6), com o cultivar Guarani apresentando

maior acúmulo de Zn devido sua maior produção de matéria seca. Com relação ao acúmulo de Zn na raiz, o cultivar Guarani acumulou maior quantidade de Zn devido esta ser uma característica da planta (VAHL, 1991), onde absorveu maior quantidade de Zn, consecutivamente acumulou maior quantidade desse micronutriente e em consequência obteve maior teor de Zn na raiz.

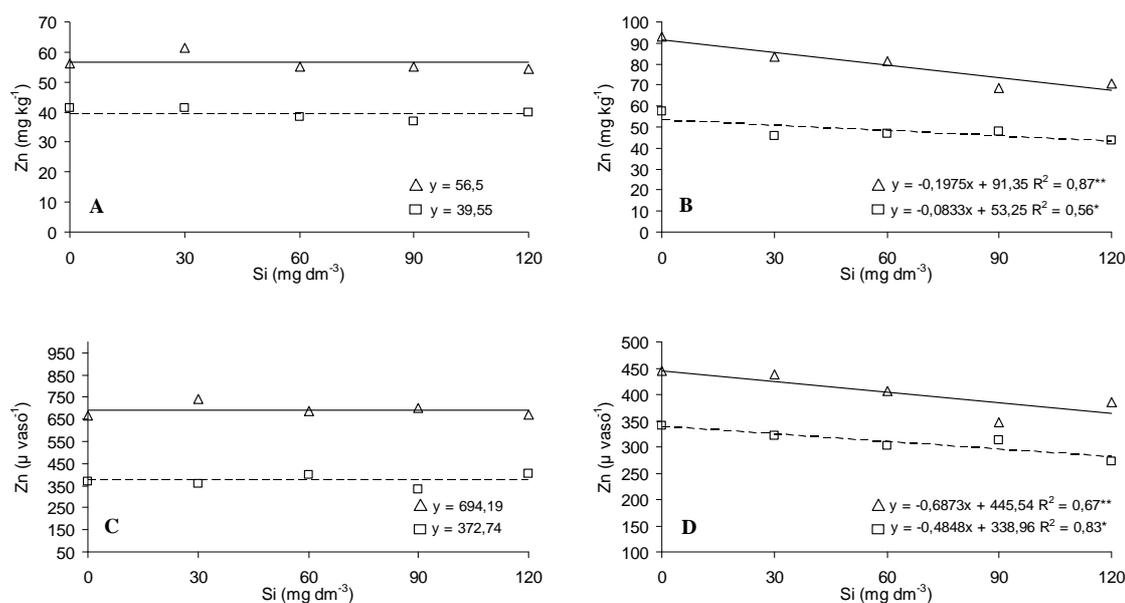


Figura 14. Teor de zinco na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de zinco na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Embora os teores de micronutrientes (B, Cu, Fe e Mn) do cultivar BRS Talento foram influenciados de forma negativa pela aplicação de Si, as plantas não foram influenciadas quanto a produção de matéria seca da parte aérea (Figura 3C), principalmente, mesmo com o decréscimo desses nutrientes, esses ainda continuaram em concentrações adequadas na planta segundo Fageria (1984a).

As doses de Si influenciaram significativamente os dois cultivares para teor e acúmulo de Si da parte aérea (Figura 15A e C). Os dois cultivares tanto o tolerante quanto o sensível ao Al⁺³, tiveram comportamento linear crescente, ou seja, com o aumento das doses de Si aumentou também o teor e acúmulo de Si da parte aérea. Isso comprova que a planta acumula Si, mas não tem necessariamente participação na tolerância de plantas de arroz ao Al⁺³ tóxico. Não ocorreram aumento na produção de matéria seca da parte aérea e raiz e

diminuição do teor de Al^{+3} (Figura 16), os quais são características que demonstram a eficiência da planta na tolerância ao Al^{+3} .

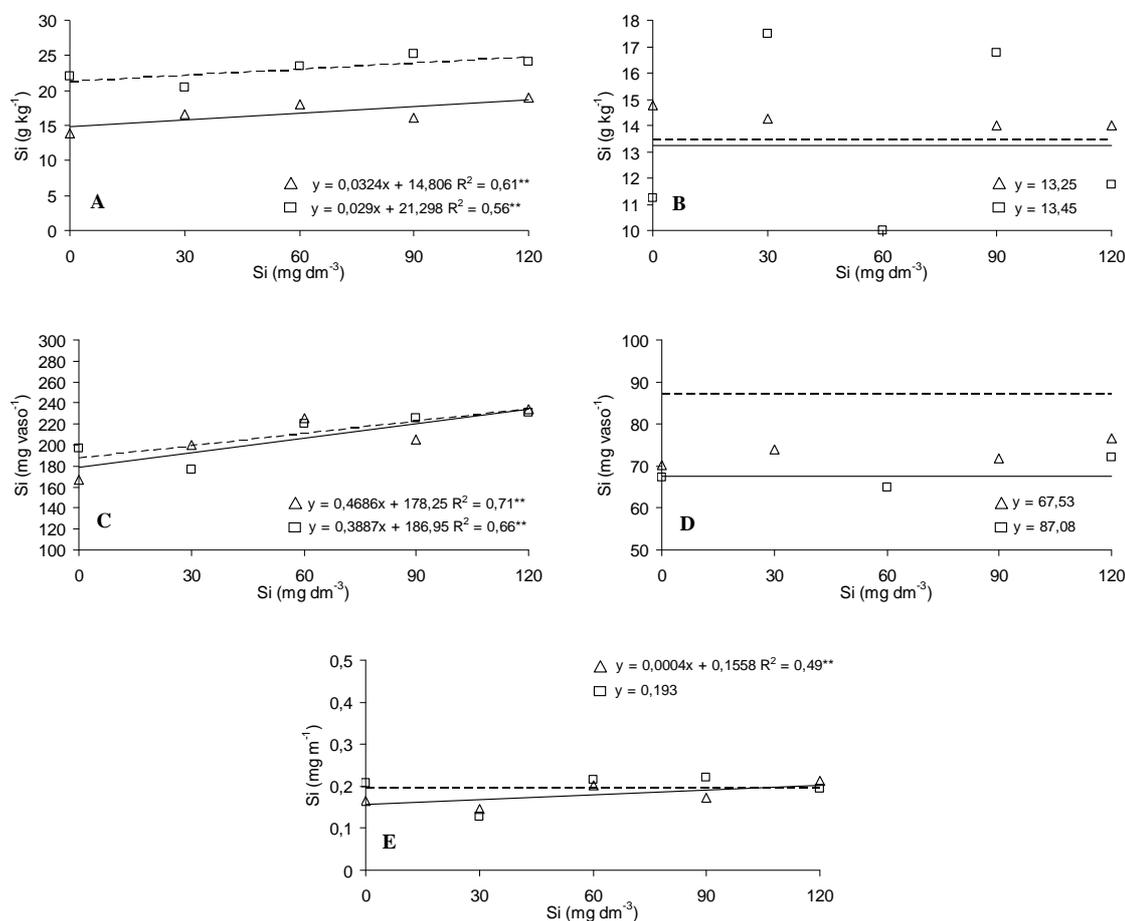


Figura 15. Teor de silício na parte aérea (A) e raiz (B), acúmulo de silício na parte aérea (C) e raiz (D) e silício absorvido por metro de raiz (E) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

Ao analisar as concentrações de Si obtidas verifica-se que estão próximas às citadas por Malavolta (2006), de que o teor de Si na palha (folha + colmo) de plantas de arroz de sequeiro situa-se entre 11,6 a 19,6 $g\ kg^{-1}$ de Si. Para Korndörfer et al. (2000), teores na faixa de 0 a 17 $g\ kg^{-1}$ de Si na palha são considerados baixos. Comparando-se o incremento dos teores de Si na planta, entre a dose 0 $mg\ dm^{-3}$ e a dose de 120 $mg\ dm^{-3}$, observa-se para cultivar BRS Talento um incremento de 8,22% e para a cultivar Guarani de 26,85%.

O teor e acúmulo de Si na raiz (Figura 15B e D) não foram influenciados pelos tratamentos empregados. Isso era esperado, já que as plantas acumulam Si nas áreas de maior transpiração (MA e TAKAHASHI, 2002), como regiões que realizam fotossíntese e perdem água por transpiração (parte aérea), devido ao Si absorvido acompanhar o fluxo de transpiração, tendo assim, menor teor na raiz.

Também houve diferença significativa entre os cultivares quanto ao teor de Si na parte aérea (Tabela 7). O cultivar BRS Talento considerado sensível ao Al^{+3} apresenta teores superiores de Si na parte aérea em comparação ao cultivar Guarani considerado tolerante ao Al^{+3} . Isso indica que possivelmente o Si não participa na tolerância das plantas de arroz ao Al^{+3} , pelo menos dentro da planta, já que o cultivar tolerante ao Al tem menor teor de Si na parte aérea do que o cultivar sensível.

Com relação ao acúmulo de Si na parte aérea (Tabela 9) ao comparar os dois cultivares, o cultivar BRS Talento considerado sensível ao Al^{+3} , acumulou maiores quantidades de Si, o que pode se relacionar a maior eficiência do cultivar na absorção de Si pelas raízes (Tabela 8), e também por característica genética da planta. Portanto, o cultivar BRS Talento se mostrou mais eficiente na absorção e acúmulo de Si. O que confirma as citações de Wislow (1992) e Barbosa Filho et al. (1998) onde relataram que há diferença genotípica quanto à capacidade de absorver Si.

Já o acúmulo de Si nas raízes (Tabela 10) pode contribuir na explicação de maior acúmulo de Si na parte aérea, sendo que o cultivar BRS Talento além de ter maior teor de Si na raiz (Tabela 8) tem também maior acúmulo de Si. A maior produção de matéria seca (Tabela 6) e volume radicular (Tabela 5) obtidos pelo cultivar BRS Talento, também podem contribuir na explicação da maior absorção e acúmulo de Si na raiz.

O Si não influenciou de forma significativa nenhum dos macro e micronutrientes para a variável absorção de nutrientes por metro de raiz. Porém, a aplicação de Si influenciou a absorção de Si por metro de Raiz (Figura 15E). Quanto a comparação entre os cultivares para absorção de nutrientes por metro de raiz (Tabela 11), houve diferença significativa para P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn, Fe, Zn.

Tabela 11. Média de absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e Si por metro de raiz em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----mg m ⁻¹ -----					
Guarani	0,221	0,008a	0,212b	0,048a	0,017a	0,031a
BRS Talento	0,193	0,006b	0,136a	0,035b	0,010b	0,021b
CV(%)	21,5	21,8	20,5	19,9	18,7	20,8
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----μ m ⁻¹ -----					mg m ⁻¹
Guarani	0,224a	0,151a	3,98a	4,237a	0,720a	0,215
BRS Talento	0,161b	0,102b	2,65b	2,313b	0,367b	0,210
CV(%)	24,7	22,9	19,5	18,2	20,3	22,8

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

O teor e acúmulo de Al⁺³ na parte aérea e raiz (Figuras 16A, B, C e D) não foram influenciadas pela adição de Si em solução nutritiva. Esperava-se que na presença de Si a quantidade de Al³⁺ na planta fosse diminuída pelo benefício proveniente do Si que ameniza a toxidez ao Al⁺³ (MA et al., 1997; COCKER et al., 1998; SANGSTER e HODSON, 2001), mas não foi o observado nesse experimento.

Resultado este semelhante ao obtido por Rahman et al. (1998) e Hara et al. (1999), onde trabalhando com doses de Si e de Al⁺³, não observaram decréscimo de Al⁺³ na parte aérea conforme se aumentou as doses de Si.

Porém, é interessante citar que segundo Fageria (1984a), teores acima de 300 mg kg⁻¹ de Al⁺³ em tecido vegetal é tóxico a planta. No entanto, na parte aérea o teor de Al não chegou a esse valor tóxico (Figura 16A), por outro lado, nas raízes esse valor foi ultrapassado, chegando a teores de quase 2400 mg kg⁻¹ de Al⁺³ (Figura 16B).

Ao comparar os dois cultivares houve diferença significativa somente para o teor de Al⁺³ na raiz (Tabela 12), onde o cultivar Guarani considerado tolerante apresentou maior teor em comparação ao cultivar sensível BRS Talento.

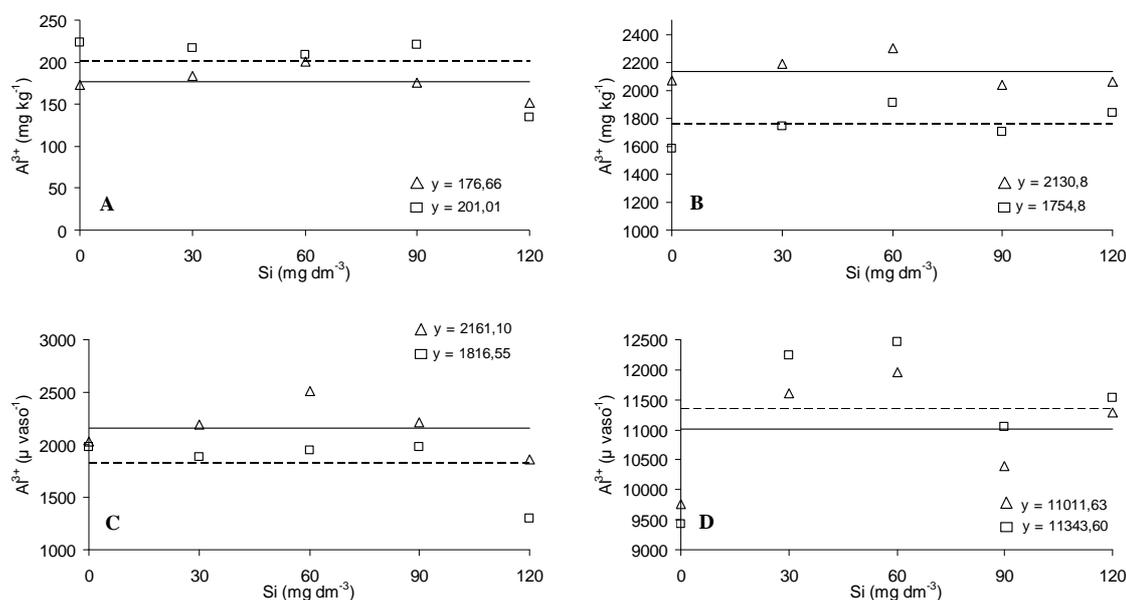


Figura 16. Teor de alumínio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de alumínio na parte aérea (C) e raiz (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Tabela 12. Média do teor de alumínio na parte aérea e raiz, acúmulo de alumínio na parte aérea e raiz e alumínio absorvido por metro de raiz em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	Teor de Al parte aérea	Teor de Al raiz	Acúmulo de Al parte aérea	Acúmulo de Al raiz	Metro de raiz
	-----mg kg ⁻¹ -----		-----μ vaso ⁻¹ -----		
Guarani	176,66	2130,75a	2161,10	11010,63	2,21
BRS Talento	201,01	1754,84b	1816,55	11342,60	1,88
CV(%)	30,95	10,43	28,20	18,06	40,13

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

Analisando os resultados de teor e acúmulo de nutrientes fica evidente que o Si não foi eficiente na amenização da toxidez do Al⁺³ para as condições do experimento. Para alguns nutrientes como Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn e Zn, o Si influenciou de forma negativa, porém, não diminuindo a produção de matéria seca de parte aérea e de raiz.

E ao analisar os dados de acúmulo de nutrientes do experimento, observa-se que as plantas acumularam em ordem decrescente na parte aérea Si, N, K, Ca, S, Mg, P, Mn, Fe, Al, Zn, B e Cu. E, na raiz N, K, Si, S, Al, Mg, P, Ca, Fe, Mn, Zn, Cu e B.

É importante citar que os tratamentos podem não ter gerado resposta confirmando a hipótese também devido a algumas outras variáveis, como idade da planta, a diferença na solução de nutrientes, duração dos tratamentos, suporte inicial de Si para as plantas, diferença de idade e desenvolvimento da planta, e diferença de espécies e cultivares (HODSON e EVANS, 1995).

O Si é um elemento benéfico que funciona melhor em ambiente de estresse, no caso estresse por Al^{+3} . No experimento as plantas foram expostas primeiro ao Si e depois ao Al^{+3} . Sugere-se que em estudos futuros a planta seja submetida ao estresse inicialmente por Al^{3+} e posteriormente adicionado o Si. Pois sob estresse a planta absorve maiores teores de Si (MA e TAKAHASHI, 2002), talvez sendo capaz de amenizar a toxidez ao Al^{+3} mais eficientemente.

Outro fator que deve ser considerado é a interação entre Si e Al^{+3} que ocorre em solução, tanto solução nutritiva como solução de solo. Sabe-se que há esse efeito, portanto para o presente experimento o Si foi adicionado antes e o Al^{+3} posteriormente, evitando assim a interação entre os dois íons em solução, e sim visar o efeito dessa interação nas plantas de arroz.

Mesmo com a não resposta do experimento quanto a amenização do Al^{+3} pelo Si, quando são realizados experimentos com o objetivo de selecionar genótipos tolerantes a estresses abióticos, como aqueles relacionados ao complexo de acidez do solo (excesso de Al e Mn), ou à salinidade, com altas concentrações de sais de Na, normalmente o Si não é incluído na formulação das soluções nutritivas usadas em pesquisas de estresses minerais. Todavia, evidências experimentais indicam que o Si deve fazer parte destas soluções. Plantas selecionadas em condições hidropônicas serão posteriormente cultivadas em solo, com Si disponível. Consequentemente, a resposta destas plantas ao estresse, em condições de campo, podem ser diferente daquela observada em condições no qual o meio nutriente é deficiente em Si. O Si é normalmente incluído na formulação das soluções nutritivas na Universidade da Califórnia, desde 1988. A concentração utilizada de Si é de $0,5 \text{ mmol L}^{-1}$, na forma de Na_2SiO_3 (EPSTEIN, 1994).

6.2. Experimento II

Para o experimento realizado em solo sob túnel plástico, a aplicação de Si não influenciou a altura de plantas para os dois cultivares (Figura 17A). O Si tem a propriedade de alterar a arquitetura das plantas, deixando-as mais eretas (DEREN et al., 1994; EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995), o que não contribuiria para aumento na altura de plantas. Altura de plantas então, é mais influenciada por nutrientes como N, que faz com que a planta cresça mais, devido a maior divisão e alongamento celular (FERNÁNDEZ et al., 1994).

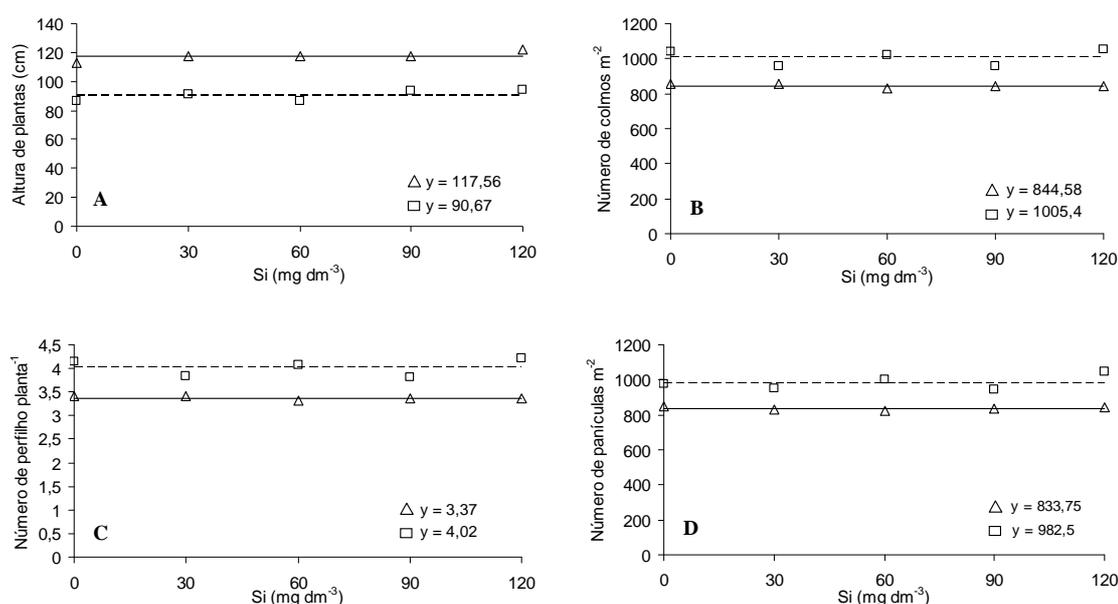


Figura 17. Altura de plantas (A), número de colmos por metro quadrado (B), número de perfilho por planta (C) e número de panículas por metro quadrado (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Ao comparar os dois cultivares pode reforçar a tese de que a altura é uma característica genética da planta, devido à diferença encontrada, tendo o cultivar Guarani com maior altura em comparação ao BRS Talento (Tabela 13). Segundo Bressegheo et al. (1998) e Pinheiro (1999) cultivares do grupo tradicional como o Guarani apresentam plantas com altura elevada, raízes profundas, baixo perfilhamento e tolerância a solos com baixos níveis de fertilidade.

O número de colmos por metro quadrado (Figura 17B) e número de perfilho por planta (Figura 17C) não foram influenciados de forma significativa pela aplicação de Si. Sabe-se que o Si tem efeito benéfico influenciando de diversas formas as plantas,

principalmente quanto a estresse bióticos e abióticos (Ma e Yamaji, 2006), porém nenhum efeito é relatado influenciando o número de colmos por metro quadrado e perfilhos por planta (MAUAD et al., 2003; ALVAREZ, 2004).

Tabela 13. Média de altura de planta, número de colmos por metro quadrado, número de perfilho por planta e número de panículas por metro quadrado em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	Altura da planta cm	Número de colmos m ⁻² ----- n° m ⁻² -----	Número de panículas m ⁻² -----	Número de perfilho planta ⁻¹ n°
Guarani	117,5a	844,5b	833,7a	3,3b
BRS Talento	90,6b	1005,4a	982,5b	4,0a
CV(%)	6,3	7,1	8,0	7,1

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

Esses resultados estão de acordo com Fageria (1984b), o qual afirma que os nutrientes necessários para um ativo perfilhamento são N, P e S. A falta de resposta quanto aplicação de Si está de acordo com os resultados obtidos por Ma et al. (1989), Deren et al. (1994), Assis et al. (2000), Carvalho (2000) e Benedito (2004) que não evidenciaram aumentos significativos nos componentes de crescimento para cultivares de arroz.

Porém, houve diferença significativa entre os cultivares. O cultivar BRS apresentou maior perfilhamento por planta (Tabela 13), consecutivamente maior número de colmos por metro quadrado (Tabela 13). O cultivar BRS Talento apresentou maior número de colmos por metro quadrado em relação à Guarani (Tabela 13). Esse resultado está relacionado à característica genética das cultivares. Cultivares do grupo moderno como a BRS Talento passaram por melhoramento genético buscando características para maior capacidade de perfilhamento, visando alta produtividade (BRESEGHELLO et al., 1998).

O número de colmos por metro quadrado não é um componente da produção, porém ele indica a capacidade de perfilhamento do cultivar, sendo influenciado principalmente pela genética do cultivar (BRESEGHELLO et al., 1998; PINHEIRO, 1999). Um cultivar perfilha mais, outro menos, porém, dependendo das condições o cultivar pode perfilhar muito, mas pode não transformar esse alto perfilhamento em altas produtividades.

Os tratamentos com Si não influenciaram o número de panículas por metro quadrado (Figura 17D) e porcentagem de colmos férteis (Figura 18A). Entretanto, houve diferença significativa entre os cultivares, tendo o cultivar BRS Talento com maior número de panículas por metro quadrado em comparação ao Guarani (Tabela 13). Apesar do cultivar BRS Talento apresentar maior número de panículas de que o cultivar Guarani, devido a seu alto perfilhamento, apresentou menor porcentagem de colmos férteis (Tabela 14).

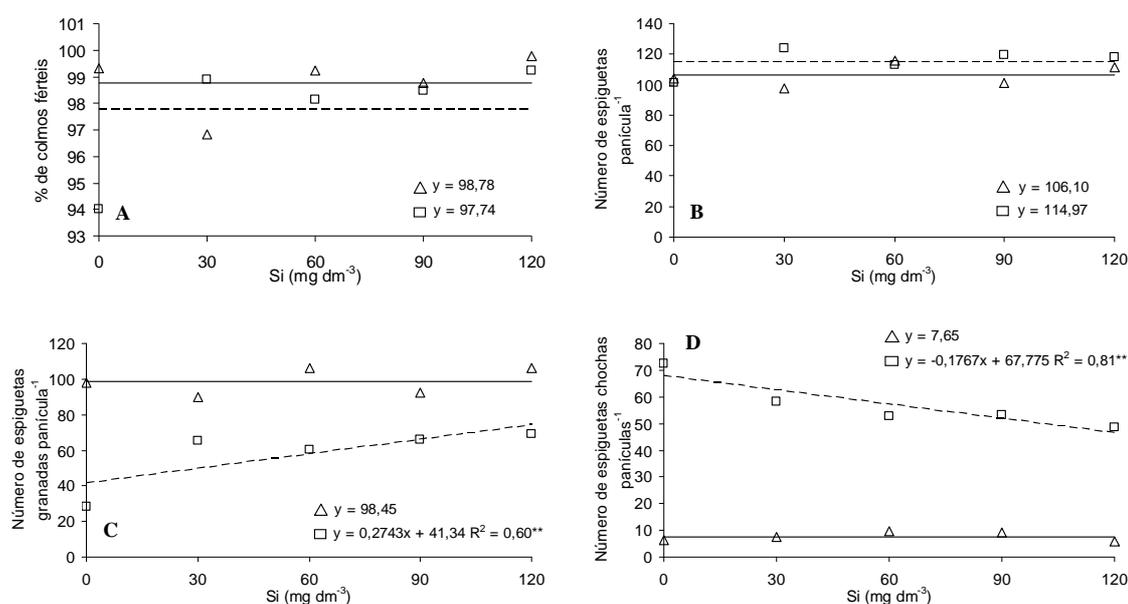


Figura 18. Porcentagem de colmos férteis (A), número de espiguetas por panícula (B), número de espiguetas granadas por panícula (C) e número de espiguetas chochas por panícula (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Tabela 14. Média de porcentagem de colmos férteis, número espiguetas por panícula, número de espiguetas granadas por panículas e número de espiguetas chochas por panículas em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	Porcentagem de colmos férteis	Espiguetas panículas ⁻¹	Espiguetas granadas panícula ⁻¹	Espiguetas chochas panícula ⁻¹
	%	n ^o		
Guarani	98,7	106,1	98,4a	7,6b
BRS Talento	97,7	114,9	57,8b	57,1a
CV(%)	5,1	13,0	21,9	44,3

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

O cultivar Guarani apresentou maior porcentagem de colmos férteis (Tabela 14), devido a este ser um cultivar considerado rústico, “tradicional”, e tolerante ao Al^{3+} , dessa forma sendo mais adaptado as condições do experimento, onde o solo apresentava principalmente baixo pH e V% e altos níveis de Al^{3+} (FORNASIERI FILHO e FORNASIERI 2006; TERRES et al., 2004).

Por outro lado o cultivar BRS Talento que é melhorado geneticamente, e tem maior potencial produtivo, apresentou menor porcentagem de colmos férteis devido a sua maior exigência em fertilidade do solo, que mesmo com a suplementação de nutrientes via adubação, o solo não se encontrava em condições ideais para o cultivar alcançar o máximo de seu potencial produtivo. Embora tenha perfilhado bastante, porém, como as condições não foram totalmente favoráveis produziu menor número de panículas.

A porcentagem de colmos férteis mostra a quantidade de colmos que transformaram-se da fase vegetativa para reprodutiva. Em outras palavras essa variável apresenta o valor em porcentagem quanto dos colmos possuíam panículas, fazendo com que essa variável influencie diretamente na produtividade de grãos. Essa passagem de fase vegetativa para reprodutiva além de ser sensível a condições climáticas, requer também teores adequados de nutrientes, sendo que cada cultivar tem sua característica. O cultivar BRS Talento por ser melhorado geneticamente, apresentando maior capacidade produtiva, necessita de solos com fertilidade superior, ao contrário do cultivar Guarani, adaptado a solos com baixo teor de nutrientes e altos níveis de Al^{3+} , como o solo utilizado no experimento.

Não houve diferença significativa para o número de espiguetas por panículas com a aplicação de Si (Figura 18B), bem como a comparação entre cultivares não foi diferente significativamente (Tabela 14). Por outro lado o número de espiguetas granadas e chochas por panícula foram influenciados pela aplicação de Si (Figura 18C e D).

A aplicação de Si influenciou somente o cultivar BRS Talento para espiguetas granadas e chochas por panícula. Devido ao cultivar ser mais exigente em nutrientes para expressar seu maior potencial produtivo, e as condições do solo onde foi realizado o experimento não eram ideais quanto a fertilidade do solo, dessa forma, o cultivar BRS Talento obteve baixas produtividades. No entanto, com a aplicação de Si, observou-se aumento no número de espiguetas granadas e diminuição no número de espiguetas chochas,

isso talvez esteja relacionado ao melhor aproveitamento dos nutrientes pela parte aérea das plantas.

Esse resultado corrobora com os obtidos por Mauad (2006), que comparando adubação silicatada para os cultivares Caiapó e Maravilha obteve resposta a adubação silicatada somente para o cultivar Maravilha, que pode ser comparado ao cultivar BRS Talento, por serem melhorados geneticamente e pertencerem ao grupo de cultivares modernos.

Resultados estes que estão de acordo com os obtidos por Houssain et al. (2001) que constataram que o número de espiguetas chochas foi reduzido com o fornecimento de silício para as plantas de arroz.

Quando comparado os dois cultivares, o número de espiguetas granadas e chochas por panícula foram diferentes significativamente (Tabela 14). O cultivar Guarani apresenta maior número de grãos granados em comparação ao BRS Talento, enquanto o cultivar BRS Talento apresentou maior número de grãos chochos. Isso reforça a hipótese de que o cultivar BRS Talento é mais exigente em fertilidade do solo como discutido anteriormente, e as condições do solo do experimento influenciaram muito para o baixo número de grãos granados e alto de chochos obtidos por este cultivar.

Outra possibilidade é a planta ao perfilhar demais (Tabela 13), e o solo não tendo condições nutricionais adequadas, a planta não consegue granar todos os grãos, por isto, o alto número de grãos chochos no cultivar BRS Talento. Enquanto o cultivar Guarani considerado “rústico” e tolerante ao Al^{+3} , tem melhor desempenho quando cultivado em solos com baixa fertilidade e alto nível de Al^{+3} , como o do experimento. Isso explica o fato de o cultivar Guarani apresentar maior número de grãos granados e baixo número de grãos chochos.

Assim como ocorreu para o número de grãos granados e chochos a fertilidade de espiguetas foi influenciada pela aplicação de Si, somente para o cultivar BRS Talento (Figura 19A). Como a fertilidade de espiguetas é a relação entre número de espiguetas granadas por panícula e número total de espiguetas por panícula o comportamento é o mesmo que o observado nas variáveis número de espiguetas granadas e chochas. A fertilidade de espiguetas começa a ser definida desde a diferenciação do primórdio da panícula até o emborrachamento (FORNASIERI FILHO e FORNASIERI, 2006).

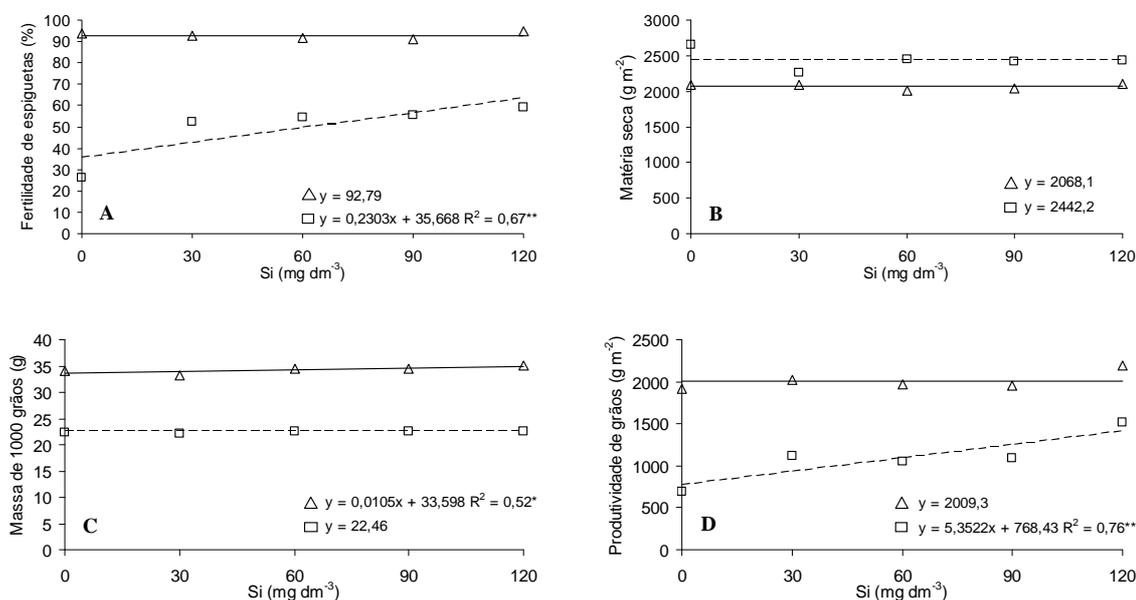


Figura 19. Fertilidade de espiguetas (A), matéria seca da parte aérea (B), massa de 1000 grãos (C) e produtividade de grãos (D) dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

Também houve diferença significativa comparando os cultivares quanto a fertilidade de espiguetas (Tabela 15). Dessa forma semelhante ao ocorrido com grãos granados, o cultivar Guarani também apresentou maior fertilidade de espiguetas em comparação ao BRS Talento. Novamente devido ao cultivar Guarani ser mais adaptado às condições de baixa fertilidade de solo. Enquanto o cultivar BRS Talento tendo maior potencial produtivo, foi limitado pela fertilidade do solo e presença do Al^{3+} . A diferença de fertilidade de espiguetas entre os cultivares foi de quase 50 %, fazendo com que essa variável influencie diretamente na produtividade de grãos dos cultivares.

A produção de matéria seca da parte aérea não foi alterada com a aplicação de Si (Figura 19B), no entanto, houve diferença significativa entre os cultivares. O cultivar BRS Talento apresenta maior produção de matéria seca (Tabela 15). Isso se deu devido ao maior perfilhamento do cultivar BRS Talento (Tabela 13), produzindo maior quantidade de matéria seca. Esses resultados estão de acordo com o obtido por Mauad (2006), onde, comparando cultivar de arroz Caiapó do grupo tradicional e Maravilha grupo moderno, constatou que o cultivar Maravilha obteve maior produção de matéria seca, que se relacionava

com o maior número de colmos obtido pelo cultivar Maravilha. Também estão de acordo com os resultados obtidos por Tanaka e Park (1966), Liang et al. (1994) e Carvalho (2000).

Tabela 15. Média de fertilidade de espiguetas, matéria seca da parte aérea, massa de 1000 grãos e produtividade de grãos em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	Fertilidade de espiguetas %	Matéria seca da parte aérea g m ⁻²	Massa de 1000 grãos g	Produtividade de grãos g m ⁻²
Guarani	92,7a	2068,1b	34,2a	2009a
BRS Talento	49,9b	2442,1a	22,4b	1090b
CV(%)	17,5	7,2	3,3	18,8

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

Mesmo o cultivar BRS Talento produzindo maior quantidade de matéria seca em comparação ao Guarani, sua produtividade foi muito inferior, isso ocorreu, devido ao BRS Talento ter maior potencial produtivo e ao aumentar sua massa seca, na fase de enchimento de grãos, o solo não supriu suas exigências em fertilidade, gerando baixo número de grãos granados e alto número de grãos chochos, tendo reflexo em produtividade de grãos.

Houve diferença significativa para massa de 1000 grãos com a aplicação de Si (Figura 19C), mas somente para o cultivar Guarani. Isso ocorreu provavelmente devido ao Si ter influenciado possivelmente na época de enchimento de grãos, melhorando o aproveitamento de água (MARSCHNER, 1995). Porém, esse efeito não refletiu em produtividade de grãos.

Ao comparar os dois cultivares o cultivar Guarani obteve maior massa de 1000 grãos em comparação ao cultivar BRS Talento (Tabela 15). Isso era esperado, já que o cultivar Guarani apresenta grãos longos, enquanto o BRS tem grãos longo e fino. Esta variável está altamente relacionada com a característica genética da planta, sendo uma característica varietal que depende do tamanho da casca, determinada duas semanas anteriores a antese (YOSHIDA, 1981) e do desenvolvimento da cariopse após o florescimento (MATSUSHIMA, 1970). Portanto dependem das translocações de carboidratos nos primeiros

sete dias para preencher a casca no sentido do seu comprimento e nos sete dias posteriores na largura e espessura (MACHADO, 1994).

É importante citar que o cultivar Guarani ao ter maior massa de 1000 grãos, consecutivamente, contribuiu para apresentar maior produtividade de grãos (Tabela 15).

Os tratamentos com Si influenciaram de forma significativa somente o cultivar BRS Talento para produtividade de grãos (Figura 19D). Com a aplicação de Si houve maior produção de grãos. Isso ocorreu devido ao Si influenciar de forma crescente o número de grãos granados por panícula (Figura 18C) e fertilidade de espiguetas (Figura 19A) do cultivar BRS Talento, dessa forma, a produtividade de grãos obteve o mesmo comportamento, por estas variáveis a influenciarem.

O aumento em produtividade do cultivar BRS Talento pode estar relacionado ao cultivar ser exigente em fertilidade de solo, e como foi cultivado sob condições de baixa fertilidade de solo e com alto nível de Al^{+3} na solução do solo, o Si foi capaz de amenizar o estresse para o cultivar mais exigente em nutrientes e sensível ao Al^{+3} , obtendo produtividade de grãos superiores em comparação ao tratamento sem Si. Porém, a máxima dose de Si para o cultivar BRS Talento obteve uma produtividade de 1512 g m^{-2} , onde ainda foi abaixo da menor produtividade obtida pelo cultivar Guarani que foi de 1913 g m^{-2} .

O efeito em produtividade proporcionado pelo Si, talvez esteja mais ligado à exigência nutricional da planta (FORNASIERI FILHO e FORNASIERI 2006; TERRES et al., 2004), e não ao cultivar ser ou não ser tolerante ao Al^{3+} . Ao passo que o cultivar BRS Talento que é sensível ao Al^{+3} , respondeu a adubação silicatada.

Os resultados obtidos foram semelhantes aos obtidos por Rahman et al. (1998), onde trabalharam com cultivares sensíveis e tolerantes ao Al^{+3} , e aplicou doses de Si e Al^{+3} , e observaram maior amenização da toxidez ao Al^{+3} nos cultivares sensíveis ao Al^{+3} .

A produtividade de grãos foi diferente significativamente quando comparados os dois cultivares (Tabela 15). Isso ocorreu provavelmente devido ao cultivar Guarani apresentar maior massa de 1000 grãos e fertilidade de espiguetas, mas também principalmente o cultivar ser mais adaptado a condições de baixa fertilidade de solo em comparação ao cultivar BRS Talento.

Estes resultados podem estar relacionados às características genéticas do cultivar Guarani que pertence ao grupo Tradicional, onde estes cultivares são “rústicos”, e

foram selecionados para solos com baixos níveis de fertilidade, além de apresentar tolerância a seca, e maior estabilidade de produção de grãos (FORNASIERI FILHO e FORNASIERI 2006; TERRES et al., 2004).

A aplicação de Si não influenciou nenhum dos macronutrientes (Figura 20). Sendo que todos estavam com teor adequado segundo descrito por Fageria (1984a). Somente o teor de Si foi influenciado pela aplicação de Si (Figura 20G), onde influenciou de forma positiva os dois cultivares. Resultado esse que corrobora com Mauad et al. (2003) e Reis et al. (2008).

Porém, para o cultivar BRS Talento, que é considerado sensível ao Al^{3+} houve uma relação com produtividade, ao aumentar a concentração de Si na parte aérea aumentou também a produtividade (Figura 19D). Resultados estes que estão de acordo com os obtidos por Mauad (2006), que com a aplicação de Si houve aumento na produtividade de grãos de arroz. No entanto, para o cultivar Guarani também houve aumento no teor de Si na parte aérea, no entanto, não ocorreu aumento de produtividade. Isso se deve provavelmente ao cultivar Guarani ser rústico quanto a exigência nutricional e tem menor teor de Si em comparação ao cultivar BRS Talento.

Esse aumento de Si na parte aérea e produtividade, pode ser considerado um benefício indireto do Si, amenizando o efeito tóxico Al^{3+} na planta, e não fazendo com que o Si seja um dos responsáveis pela planta apresentar ou não tolerância ao Al^{3+} . Dessa forma, leva a crer que o Si não influencia na tolerância ao Al^{3+} pelas plantas, sendo esta, característica relacionada a genes específicos da planta, proporcionando capacidade maior ou menor de tolerância ao Al^{3+} presente no solo. Isso é observado devido ao cultivar Guarani, considerado tolerante ao Al^{3+} , não responder a adubação com Si, evidenciando que a tolerância ao Al^{3+} pela planta de arroz de terras altas é uma característica genética da planta.

Outro benefício que pode ser atribuído ao Si no aumento da produtividade de grãos do cultivar BRS Talento (Figura 19D), é que a planta ao absorver Si tem melhor aproveitamento da água (AGARIE et al., 1992; MARSCHNER, 1995; TAKAHASHI, 1995; FARIA, 2000; KORNDÖRFER et al., 2003). Dessa forma, tem melhor aproveitamento de nutrientes e o enchimento de grãos é mais eficiente, influenciando o número de grãos granados e fertilidade de espiguetas, refletindo em produtividade de grãos.

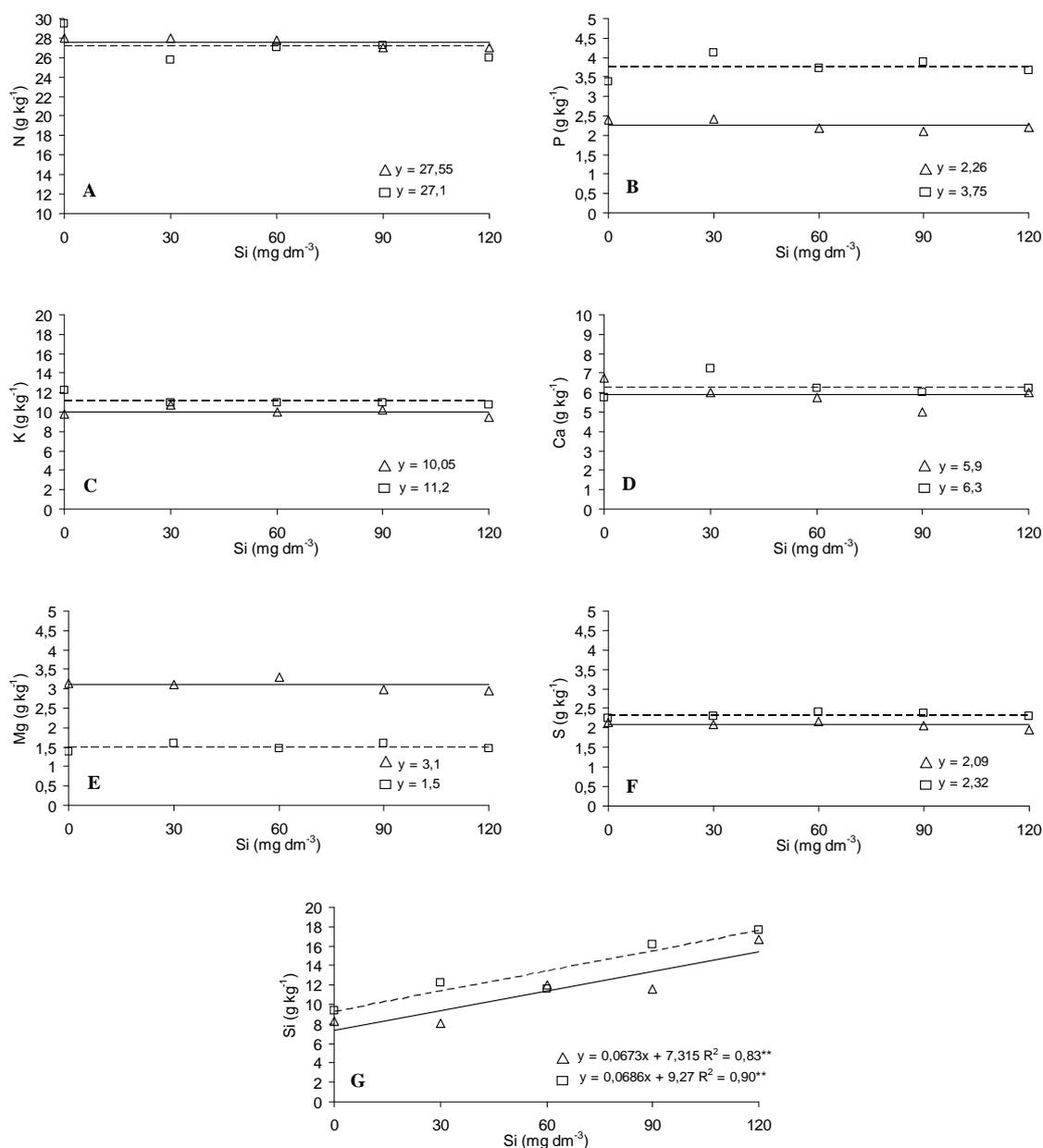


Figura 20. Teor de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E), enxofre (F) e silício (G) na folha bandeira dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Os teores de Si obtidos estão próximos aos citados por Malavolta (2006), de que o teor de Si na palha (folha + colmo) de plantas de arroz de sequeiro situa-se entre 11,6 a 19,6 g kg⁻¹ de Si. Entretanto Korndörfer et al. (2000) cita que teores na faixa de 0 a 17 g kg⁻¹ de Si na palha são considerados baixos. Comparando-se o incremento dos teores de

Si na planta, entre a dose 0 mg dm^{-3} e a dose de 120 mg dm^{-3} , observou-se para o cultivar BRS Talento um incremento de 47,16% e para o cultivar Guarani de 50,30%.

Ao comparar os dois cultivares quanto aos macronutrientes (Tabela 16), observa-se que houve diferença significativa somente para os teores de P, K, Mg, S e para o elemento benéfico Si. O cultivar BRS Talento apresentou maior teor de P, K e S em comparação ao Guarani, resultados esses que diferem dos obtidos por Sivaguru e Paliwal (1993) e Mendonça et al. (2003), que citam que cultivares tolerantes ao Al^{+3} apresentam teores de P e K mais elevados do que as cultivares sensíveis.

Tabela 16. Média de teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na folha bandeira das plantas em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg ⁻¹ -----					
Guarani	27,55	2,26b	10,05b	5,90	3,10a	2,09b
BRS Talento	27,10	3,75a	11,20a	6,30	1,50b	2,32a
CV(%)	6,6	8,2	12,4	14,2	10,4	8,3
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----mg kg ⁻¹ -----					g kg ⁻¹
Guarani	23,80b	8,65a	138,30	54,15b	24,65a	11,35b
BRS Talento	31,05a	7,30b	112,70	71,40a	16,00b	13,39a
CV(%)	12,4	13,0	46,2	11,5	26,9	13,4

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

E o cultivar Guarani apresentou maior teor de Mg, resultado esse que é semelhante ao obtido por Mendonça et al. (2003), onde citam que cultivares tolerantes ao Al^{+3} apresentam teores superiores de Mg em comparação a cultivares sensíveis ao Al^{3+} . No entanto, esses teores podem ser relacionados a capacidade da planta em obter teores de tais nutrientes, ou seja, são características de cada cultivar que faz com que obtenha maiores ou menores teores de determinado nutriente.

Quanto ao teor de Si, ao comparar os dois cultivares, o cultivar BRS Talento apresentou maior teor de Si em comparação ao Guarani (Tabela 16), isso reforça a

hipótese que o Si interno na planta não tem influencia na tolerância das plantas ao Al^{+3} , já que o cultivar BRS Talento é sensível ao Al^{+3} , e teoricamente o cultivar tolerante teria que ter maior teor de Si.

Entre os micronutrientes somente o teor de B do cultivar BRS Talento foi influenciado pela aplicação de Si (Figura 21A), apresentando comportamento linear decrescente. Conforme comentado no experimento I o ácido bórico tem similaridade química com o ácido silícico em solução (MARSCHNER, 1995), dessa forma, o Si pode ter influenciado negativamente o teor de B. Também há a hipótese de que o Si pode reduzir a toxidez por B, mesmo nas condições do experimento não havendo toxidez por B, o Si pode ter diminuído o transporte de B para a parte aérea. É importante salientar que mesmo com o decréscimo do teor de B na parte aérea, a produtividade grãos não foi influenciada de forma negativa por este micronutriente. Pelo contrário, a produtividade foi crescente, devido aos benefícios do Si na planta. E mesmo com o decréscimo de B nas folhas bandeiras das plantas do cultivar BRS Talento, na maior dose de Si onde houve menor concentração de B, este ainda se encontrava dentro da faixa considerada ideal para o teor do referido micronutriente (FAGERIA, 1984a).

Houve diferença significativa para o teor dos micronutrientes B, Cu, Fe e Zn ao comparar os dois cultivares (Tabela 16). O cultivar BRS Talento tem maior teor de B e Fe, e o cultivar Guarani maiores teores de Cu e Zn. Vahl (1991) cita que os genótipos de arroz apresentam diferentes capacidades de absorção e de utilização de nutrientes.

O Si influenciou somente o cultivar sensível ao Al^{+3} , diminuindo o teor de Al^{+3} da planta (Figura 21F). Ou seja, ao passo que aumentou-se o teor de Si na planta (Figura 20G) diminuiu-se o de Al^{+3} (Figura 21F), resultado esse semelhante ao obtido por Cocker et al. (1998), onde citam que a absorção de Si e Al^{+3} é exclusiva quando um é absorvido o outro deixa de ser.

Pode se dizer que o decréscimo no teor de Al^{+3} mediante a aplicação de Si não influenciou no aumento de produtividade de grãos, e consecutivamente na amenização pelo Si. O Al^{+3} na planta influencia negativamente na absorção de nutrientes (BRONDANI e PAIVA, 1996), e mesmo com o decréscimo de Al^{3+} na parte aérea mediante a aplicação de Si, não houve aumento dos teores de macro e micronutrientes (Figura 20 e 21).

Dessa forma, o Si influencia o cultivar BRS Talento ao amenizar a toxidez por Al^{3+} de forma indireta.

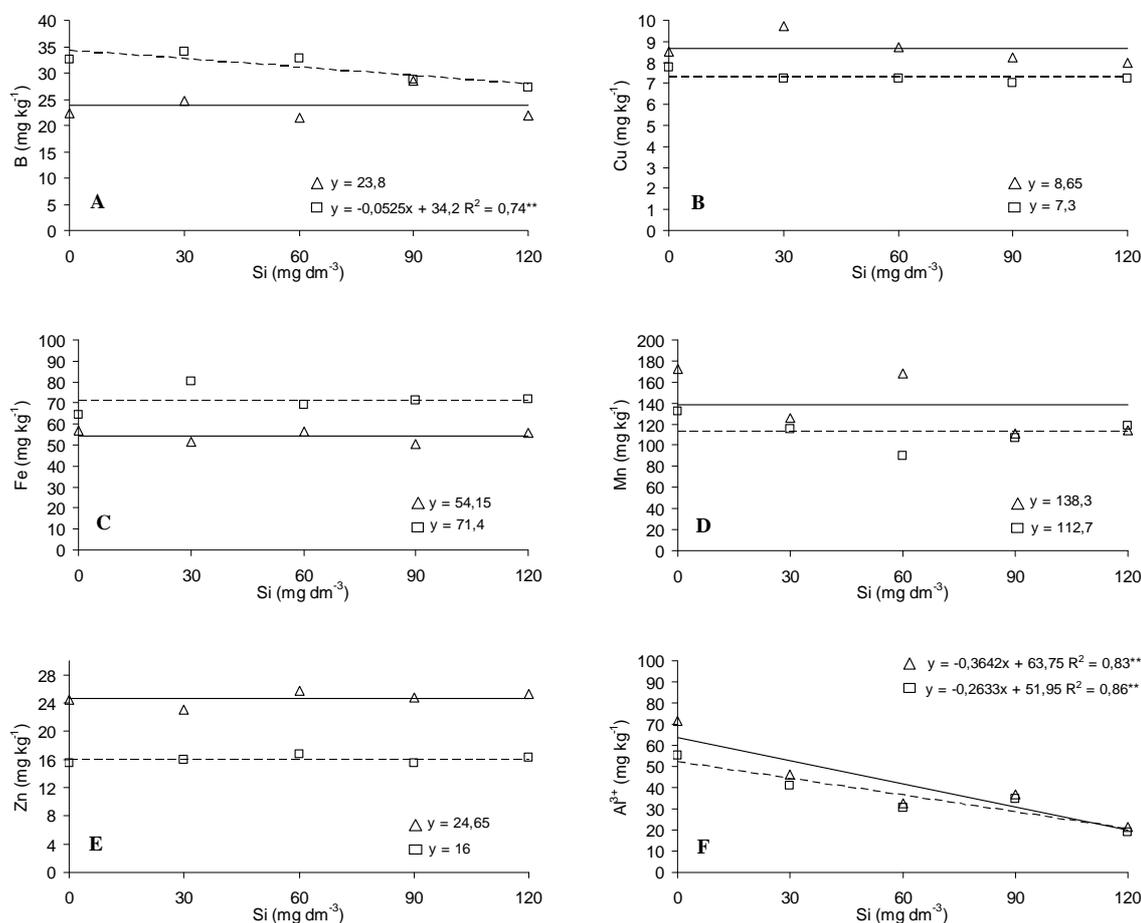


Figura 21. Teor de boro (A), cobre (B), ferro (C), manganês (D), zinco (E) e alumínio (F) na folha bandeira dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

O teor e acúmulo de Al^{3+} na folha bandeira foi significativamente diferente entre os cultivares (Tabela 17). O cultivar Guarani apresentou maior teor e acúmulo de Al^{3+} na parte aérea, isso demonstra que sendo cultivar tolerante ao Al^{3+} , mesmo acumulando maior quantidade de Al^{3+} , é provável que tenha algum mecanismo interno de tolerância. Isso é observado analisando a produtividade de grãos dos cultivares, onde o cultivar Guarani obteve maior produtividade, portanto, mais tolerante ao Al^{3+} presente no solo.

Tabela 17. Média de teor de alumínio na folha bandeira e acúmulo de alumínio na parte aérea total das plantas em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	Teor de Al ³⁺	Acúmulo de Al ³⁺
	mg kg ⁻¹	mg m ⁻²
Guarani	41,90a	671,90a
BRS Talento	36,15b	569,80b
CV(%)	5,5	8,4

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

Os acúmulos de N e Ca foram influenciados significativamente de forma negativa pela aplicação de Si somente para o cultivar BRS Talento (Figura 22A e D). Com o aumento do Si aplicado houve diminuição no acúmulo de N na parte aérea. Há possibilidade de que tenha ocorrido interação entre o N e o Si, onde o H₃SiO₄ e o NO₃⁻ concorrem pelo mesmo sítio de absorção (WALLACE et al., 1976; WALLACE, 1989), o que pode ter diminuído o acúmulo de N na parte aérea.

Essa interação e competição pelo mesmo sítio de absorção ocorreu somente no cultivar BRS Talento, o que evidencia que essa interação negativa ocorre somente em alguns cultivares. Mesmo com a diminuição do acúmulo de N da parte aérea houve aumento da produtividade de grãos, fazendo com que esse decréscimo do acúmulo de N não influenciou de forma negativa o desempenho da planta. Mauad et al. (2003), trabalhando com doses de nitrogênio e silício em arroz de sequeiro observaram que os teores de silício na planta decrescem conforme aumentam as doses de nitrogênio em cobertura.

Também, Fallah (2008) 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 tem 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 à todas as parcelas.

O acúmulo de K na parte aérea do cultivar BRS Talento foi significativo quando se aplicou Si (Figura 22C). Ao aumentar a dose de Si aplicado também houve aumento do acúmulo de K na parte aérea. Analisando o teor de K do solo, verifica-se que o Si não aumentou o teor de K no solo. Provavelmente esse maior acúmulo de K pela

parte aérea ocorreu devido ao Si e o K estarem envolvidos no processo fisiológico de perda de água da planta (SALISBURY e ROSS, 1992; TAIZ e ZEIGER, 2009; ZEIGER, 2000; SCHROEDER et al., 2001). Dessa forma o Si fez com que a planta utilizasse melhor a água e por consequência, aumentou o acúmulo de K.

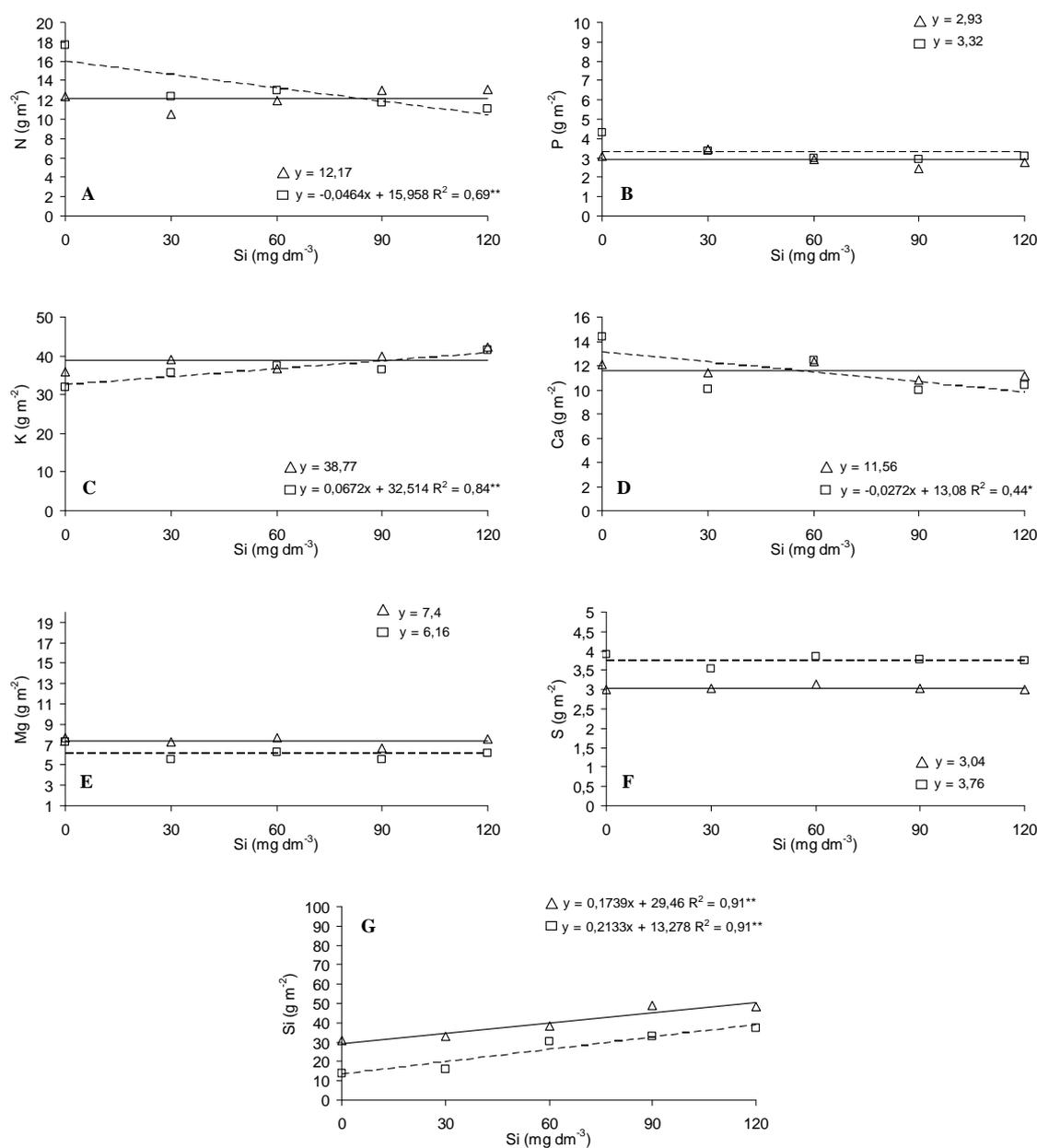


Figura 22. Acúmulo de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E), enxofre (F) e silício (G) na parte aérea dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Esse aumento no acúmulo de K pode ter contribuído para o aumento na produtividade de grãos do cultivar BRS Talento (Figura 19D), já que o K é um dos nutrientes mais requerido pela cultura do arroz de terras altas.

Os tratamentos influenciaram significativamente o acúmulo de Ca na parte aérea (Figura 22D), onde, ao aumentar a concentração do Si aplicado, houve decréscimo no acúmulo de Ca da parte aérea. Já o acúmulo de P, Mg e S não foram influenciados pela aplicação de Si (Figura 22B, E e F), e apresentam o mesmo comportamento dos teores desses nutrientes, não havendo resposta a adubação silicatada.

O acúmulo de Si na parte aérea foi influenciado significativamente pela aplicação de Si no solo (Figura 22G). Assim como ocorreu no teor de Si (Figura 20G) os dois cultivares obtiveram resposta linear crescente, enquanto aumentou-se a dose de Si aplicado também promoveu acréscimo no acúmulo de Si na parte aérea. Observa-se que os cultivares absorvem maior quantidade de Si com a adubação silicatada, mas em solos com altos níveis de Al^{+3} , esse aumento de acúmulo de Si na planta não é traduzido em maior produtividade para o cultivar Guarani. Por outro lado o cultivar sensível ao Al^{+3} , também acumulou mais Si na parte aérea (Figura 22G), e neste, a produtividade de grãos acompanhou esse comportamento (Figura 19D). Observa-se que para o cultivar sensível ao Al^{+3} o Si proporcionou influencia indireta na amenização da toxidez por Al.

O acúmulo de Al^{+3} na parte aérea foi influenciado de forma significativa com a aplicação de Si (Figura 23F), porém, o acúmulo de Al^{+3} não pode ser relacionado somente ao acúmulo de Si, como aconteceu para o teor de Si e Al^{+3} na parte aérea (Figura 20G e 21F). Ao aumentar a dose de Si aplicada no solo, inicialmente há uma queda no acúmulo de Al^{+3} na parte aérea até 449 mg m^{-2} , porém, com o aumento das doses o acúmulo sobe novamente.

Quanto ao acúmulo dos micronutrientes Cu, Fe e Mn (Figura 23B, C e D) houve influencia significativa somente para o cultivar BRS Talento, apresentando comportamento linear decrescente. Cu, Fe e Mn poderiam ter sido influenciados por aumento no pH do solo, já que com o aumento do pH o teor disponível desses micronutrientes no solo diminui. Porém, não foi observado no solo, onde a fonte de Si utilizada não influenciou o pH do solo (Figura 24A).

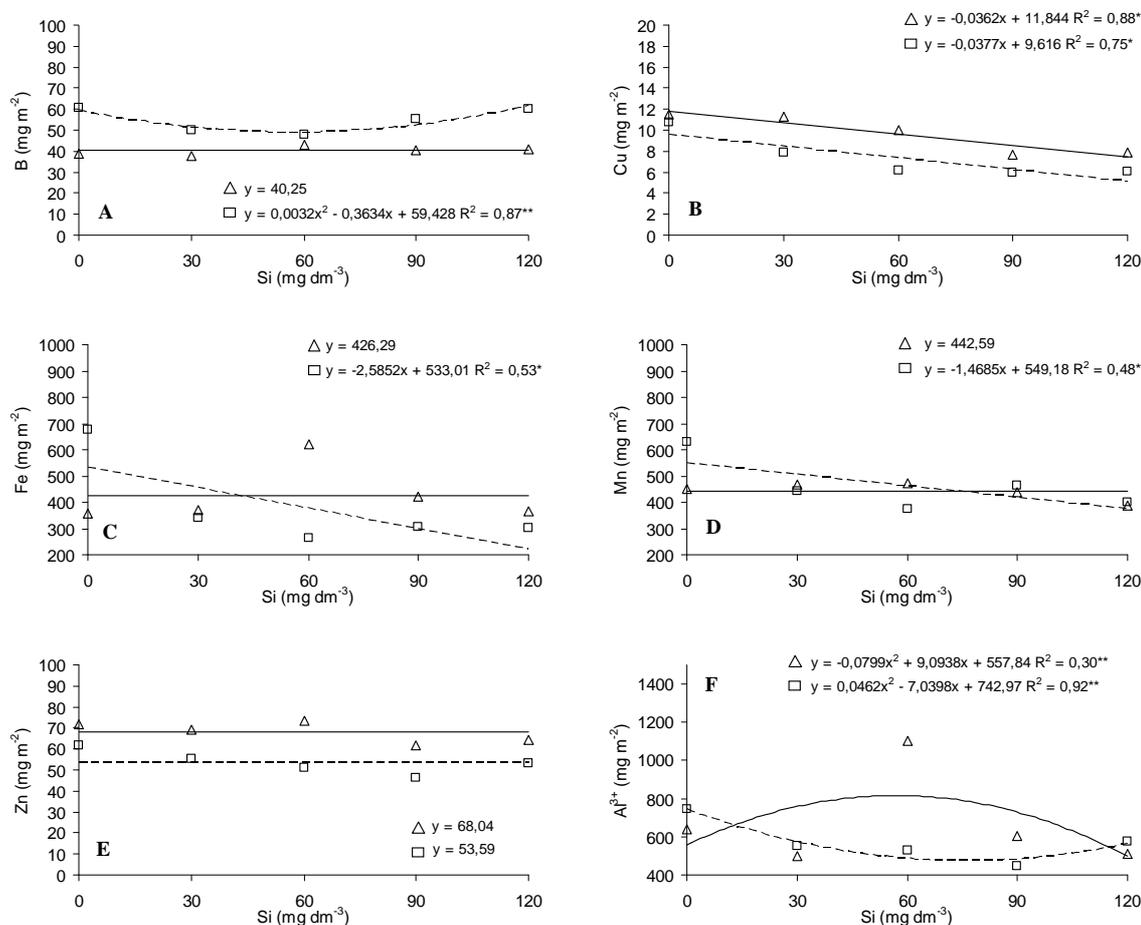


Figura 23. Acúmulo de boro (A), cobre (B), ferro (C), manganês (D), zinco (E) e alumínio (F) na parte aérea dos cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Com relação ao Fe e Mn, o Si pode diminuir a toxidez por Fe e Mn em planta de arroz (BARBOSA FILHO, 1987; TAKAHASHI, 1995; SAVANT et al., 1997). Mesmo no experimento não sendo o caso de toxidez por esses micronutrientes, pode ser que com a aplicação de Si tenha diminuído a eficiência das plantas ao absorver esses nutrientes.

Houve diferença significativa para o acúmulo de B na parte aérea do cultivar BRS Talento (Figura 23A), obtendo um resultado quadrático, onde inicialmente houve um decréscimo no acúmulo de B até 47,87 mg m⁻² e posterior aumento.

O acúmulo de Zn não foi influenciado pela aplicação de Si no solo (Figura 23E), apresentando o mesmo comportamento para o teor de Zn na parte aérea, isto é, o Zn não é influenciado pela aplicação de Si.

Comparando os dois cultivares quanto ao acúmulo de nutrientes (Tabela 18), houve diferença significativa para Mg e S entre os macronutrientes, sendo que o cultivar Guarani apresentou maior acúmulo de Mg e o BRS Talento maior acúmulo de S, semelhante comportamento obtido no teor desses nutrientes na parte aérea. Porém, o acúmulo do elemento benéfico Si foi maior no cultivar Guarani. Que esta de acordo ao proposto por Winslow (1992), onde cita que cultivares tradicionais como o Guarani, apresentam maior eficiência na absorção de silício.

Com relação ao acúmulo de Al^{+3} o cultivar Guarani acumulou maior quantidade na parte aérea, assim como ocorreu no teor (Tabela 17).

Tabela 18. Média de acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g m ⁻² -----					
Guarani	12,17	2,93	38,77	11,56	7,40a	3,04b
BRS Talento	13,17	3,32	36,55	11,45	6,16b	3,76a
CV(%)	22,1	32,0	12,0	19,4	15,3	9,6
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----mg m ⁻² -----					g m ⁻²
Guarani	40,25b	9,37a	442,59	426,29	68,04a	39,89a
BRS Talento	54,74a	7,35b	461,07	377,90	53,59b	26,08b
CV(%)	12,7	36,1	25,9	54,3	22,8	16,4

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

Com relação aos micronutrientes, houve diferença significativa entre os cultivares para o acúmulo de B, Cu e Zn (Tabela 18). Isso ocorreu devido a absorção desses micronutrientes pelos cultivares ser uma característica genética da planta (VAHL, 1991).

Quanto as características do solo, pH, SB, CTC e V% não foram influenciados pela aplicação de Si (Figura 24A, C, D e E). O pH do solo não foi influenciado pela aplicação de Si, mesmo o íon Si tendo a capacidade de alterar o pH do solo, devido à reação da base SiO_3^{-2} forma $H_2SiO_3^-$ (ALCARDE, 1992), que reduz o H^+ presente na solução do solo. Também devido ao seu próprio pH que é de cerca de 8,0, mas não foi o verificado

para o experimento. Talvez a concentração aplicada de Si não foi suficiente para o íon alterar o pH do solo.

Resultado este que está em desacordo com Melo (2005), que aplicando dose de silício de 450 mg dm^{-3} em um Latossolo Vermelho-Amarelo, verificou aumento de pH em CaCl_2 de 5,5 para 6. Porém, vale ressaltar que para o presente experimento foi aplicado cerca de 4 vezes menos Si.

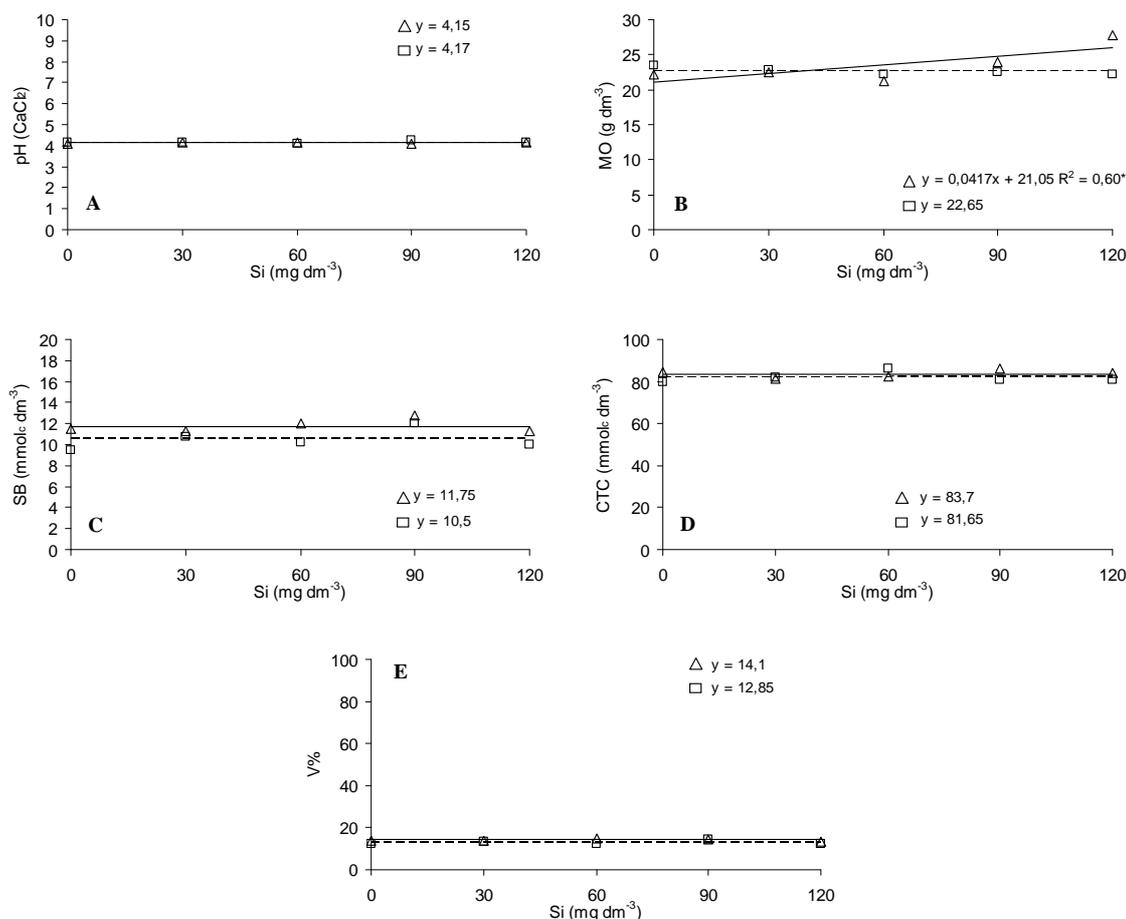


Figura 24. pH (A), matéria orgânica (B), soma de bases (C), capacidade de troca de cátions (D) e saturação de bases (E) do solo cultivado com cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

No entanto, a MO do solo foi influenciada pela aplicação de Si, porém, somente para o cultivar Guarani. Também, não houve diferença significativa entre os cultivares para as demais características do solo citadas (Tabela 19). Esperava-se maior pH do solo onde cultivou-se o cultivar tolerante ao Al^{+3} Guarani, devido aos cultivares de arroz

tolerantes ao Al^{3+} apresentarem maior capacidade para elevar o pH da rizosfera (GANESAN et al., 1993; MENDONÇA et al., 2005), mas não foi o ocorrido.

Tabela 19. Média de pH, matéria orgânica, fósforo, alumínio, hidrogênio+alumínio potássio, cálcio, magnésio, soma de bases capacidade de troca de cátions e saturação por bases do solo em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	pH	MO	P	Al^{3+}	H+Al	K
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmolc dm ⁻³ -----		
Guarani	4,15	23,55	112,65	9,85	71,90	0,53
BRS Talento	4,17	22,65	101,55	9,85	71,30	0,63
CV(%)	2,0	15,4	21,0	16,5	7,3	26,9
	Ca	Mg	SB	CTC	V%	
	-----mmolc dm ⁻³ -----					%
Guarani	10,05	1,15	11,75	83,70	14,10	
BRS Talento	8,80	1,00	10,50	81,95	12,85	
CV(%)	22,9	22,4	20,7	5,3	22,4	

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

O Si aplicado não influenciou nenhum nutriente do solo, entre eles K, Ca e Mg (Figura 25D, E e F). Ao alterar a disponibilidade desses nutrientes no solo, esperava-se influência direta na SB (Figura 24C), consecutivamente CTC e V% (Figura 24D e E). Mas, como as bases não foram influenciadas pela aplicação de Si a SB, CTC e V% também não foram.

O teor de P do solo não foi influenciado pela aplicação de Si (Figura 25A). Porém, esperava-se que o Si aumentasse a disponibilidade de P no solo, principalmente pelo fato de o Si e o fosfato serem retidos (adsorvidos) pelos óxidos de ferro e de alumínio da fração argila, podendo competir entre si pelos mesmos sítios de adsorção, ou seja, silicato pode deslocar fosfato previamente adsorvido, das superfícies oxídicas (OBIHARA e RUSSEL, 1972; OLIVEIRA, 1984; BALDEON, 1995; LEITE, 1997; CARVALHO et al., 2000), dessa forma podendo liberar P para a solução do solo. Também o

pH afeta a disponibilidade de P (FAGERIA, 1984b), mas como o Si não influenciou o pH (Figura 24A), este não influenciou o teor de P do solo de forma indireta.

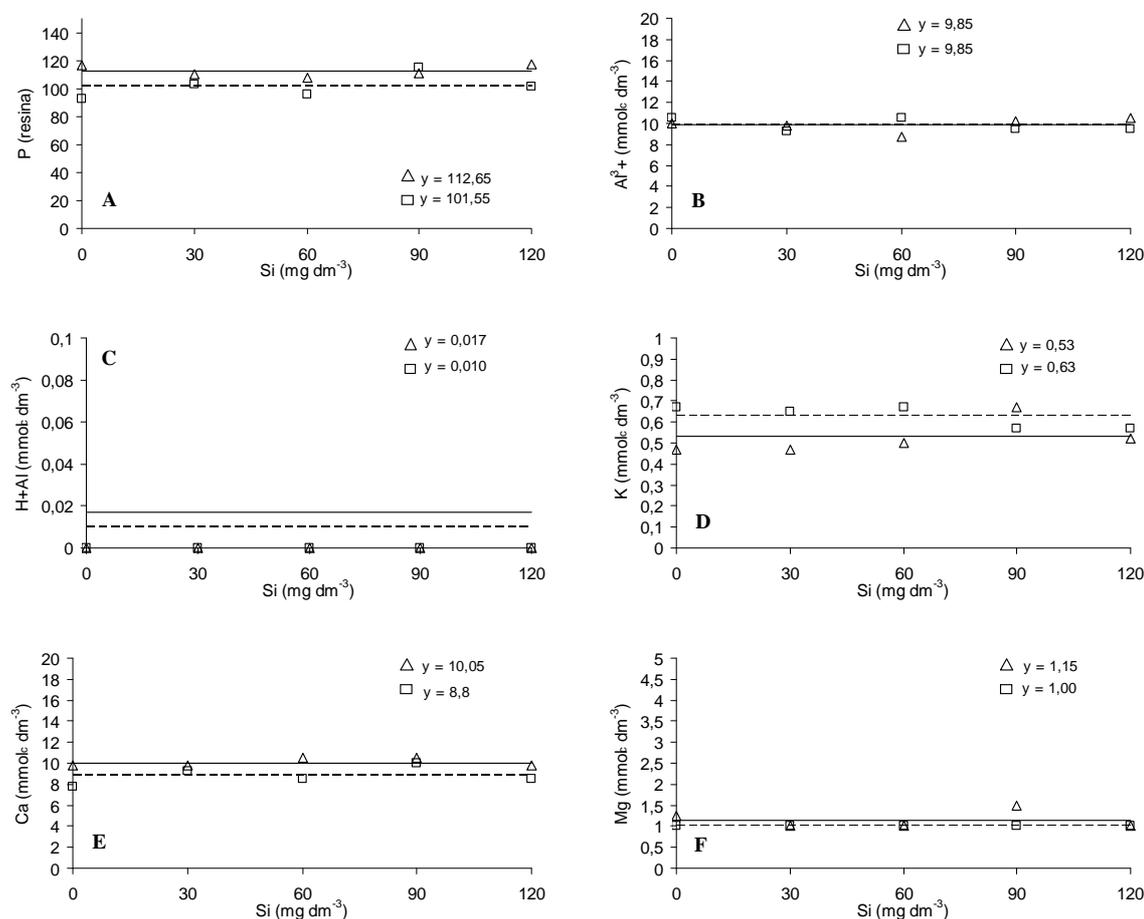


Figura 25. Teor de fósforo (A), alumínio (B), hidrogênio + alumínio (C), potássio (D), cálcio (E) e magnésio (F) do solo cultivado com cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (□) em função de doses de silício.

Para o teor de Al³⁺ no solo esperava-se que diminuísse com a aplicação de Si, mas não foi observado (Figura 25B). Com a aplicação de Si no solo, há interação com o Al³⁺ e se transforma em composto não solúvel denominado hidroxialuminosilicatos – HAS (EXLEY, 1998), porém, devido a não diminuição do teor de Al do solo, pode-se concluir que não houve essa interação no solo. Provavelmente o benefício do Si se deu somente na parte aérea das plantas, devido ao fato de o teor de Al³⁺ na parte aérea ser reduzido com a aplicação de Si (Figura 21F).

O teor de Si do solo aumentou com a aplicação de Si (Figura 26F), o que pode se relacionar ao aumento do teor de Si na parte aérea das plantas (Figura 20G), e com o aumento de produtividade do cultivar BRS Talento (Figura 19D). O teor de Si aumentou, porém, atingindo o máximo de 4 mg kg^{-1} , valor esse que não é alto. Pelo contrário, é um valor baixo, onde Kondorfer et al. (2001), classifica o solo quanto ao teor de Si, da seguinte maneira: teores de 6 mg dm^{-3} são considerados baixos, entre $6\text{-}24 \text{ mg dm}^{-3}$ médios, e altos acima de 24 mg dm^{-3} .

Ainda, ao observar o baixo teor de Si inicial do solo (Tabela 3), que é consequência do avançado grau de intemperismo em que se encontram os solos de regiões tropicais (BARBOSA FILHO et al., 2001) e dos elevados teores de sesquióxidos de Al e Fe (MALAVOLTA, 1980), que são os principais responsáveis pela adsorção de Si em solução (MENGEL e KIRKBY, 1987), pode-se inferir que o aumento no teor de Si disponível do solo foi mínimo, sendo elevado de 2 para 4 mg kg^{-1} .

É relevante citar que o cultivar Guarani foi eficiente ao acumular Si na parte aérea, pois o teor inicial disponível de Si no solo do vaso era $0,08 \text{ g de Si}$ e na parte aérea acumulou $3,6 \text{ g de Si}$, a diferença foi de $3,52 \text{ g}$. Na dose de 120 mg dm^{-3} de Si, a parte aérea do cultivar Guarani acumulou 6 g de Si (Figura 22G), onde o solo inicialmente estava com 2 mg dm^{-3} de Si (Tabela 4). Com a aplicação de 120 mg dm^{-3} de Si, iniciou-se o experimento com $4,88 \text{ g de Si}$ no solo do vaso, e no fim do experimento, o teor de Si do solo para essa dose no cultivar Guarani foi de 4 mg kg^{-1} , ou seja $0,16 \text{ g de Si}$. Esses valores evidenciam a alta extração de Si pelas plantas de arroz (LIMA FILHO et al., 1999), pois mesmo com a adição de Si, o teor final de Si no solo foi baixo, dessa forma, observa-se a eficiência de extração de Si pelas plantas de arroz (LIMA FILHO et al., 1999).

Korndörfer et al. (1999b), citam que as adubações fornecendo silício devem ocorrer quando o solo apresentar valores de silício inferiores a 20 mg dm^{-3} . Dessa forma, fica evidente que o teor de 4 mg kg^{-1} é baixo, e isso se dá pela alta extração de Si pelas plantas de arroz.

Os micronutrientes do solo não foram influenciados de forma significativa pela aplicação de Si (Figura 26A, B, C, D e E). Sendo o resultado esperado, já que as interações entre Si e micronutrientes ocorreram na planta, principalmente com o Fe e

Mn. Porém, o comportamento dos micronutrientes na presença de Si e Al^{+3} não eram bem conhecidos, mas, o Si não influenciou o teor de nenhum micronutriente avaliado.

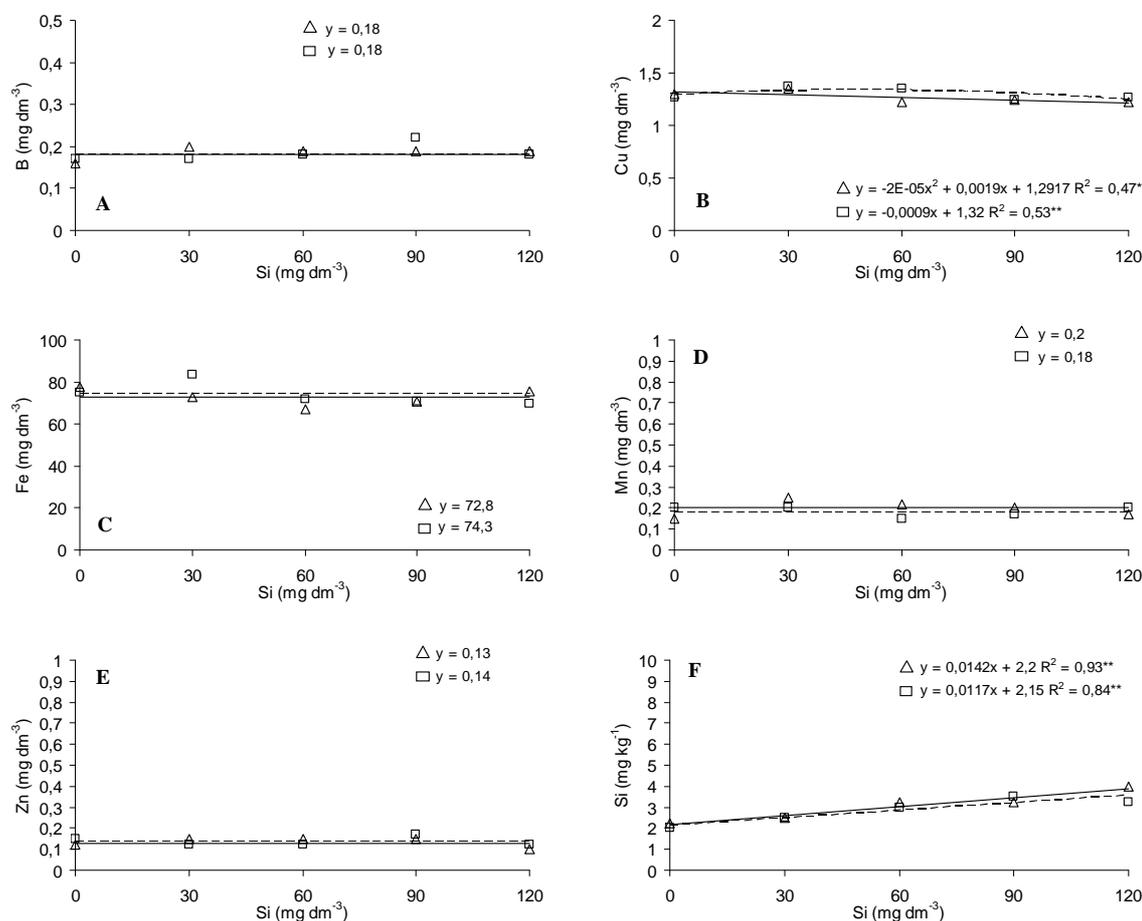


Figura 26. Teor de boro (A), cobre (B), ferro (C), manganês (D), zinco (E) e silício (F) do solo cultivado com cultivares de arroz Guarani (Δ) e BRS Talento (\square) em função de doses de silício.

Também não houve diferença significativa para as características do solo avaliadas ao comparar os dois cultivares (Tabela 20), ao final do experimento.

Tabela 20. Média do teor de boro, cobre, ferro, manganês, zinco e silício do solo em função da aplicação de Si nos cultivares de arroz Guarani e BRS Talento.

Cultivares	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Si
	-----mg dm ⁻³ -----					mg kg ⁻¹
Guarani	0,18	1,27	72,80	0,20	0,13	3,05
BRS Talento	0,18	1,30	74,30	0,18	0,14	2,85
CV(%)	18,3	4,4	10,1	41,6	36,9	23,1

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

7. CONCLUSÕES

Não há interação do Si adicionado à solução nutritiva na tolerância dos cultivares de arroz de terras altas, Guarani e BRS Talento, ao Al^{3+} disponibilizado as plantas após o Si.

Com o aumento do teor de Si na parte aérea de plantas cultivadas em solução nutritiva, onde o Al^{3+} é disponibilizado as plantas após o Si, não há decréscimo do teor de Al^{3+} nas plantas independente dos cultivares.

Quando do fornecimento do Si ao solo naturalmente alumínico o Si ameniza a toxidez ao Al^{3+} para o cultivar BRS Talento, aumentando sua produtividade.

O Si promove decréscimo no teor de Al^{3+} na parte aérea dos cultivares Guarani e BRS Talento em solo naturalmente alumínico.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. Relationship between acidity and chemical properties of brazilians soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 337-343, 2003.

AGARIE, S. et al. Physiological Roles of Silicon in Photosynthesis and Dry Matter Production in Rice Plants. I. Effects of Silicon and Shading Treatments. **Japanese Journal of Crop Science**, Tokio, v. 61, p. 200-206, 1992.

AHN, S. J. et al. Aluminum inhibits the H⁺-ATPase activity by permanently altering the plasma membrane surface potentials in squash roots. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 126, p. 1381-1390, 2001.

ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos**: características e interpretações técnicas. 2. ed. São Paulo: ANDA, 1992. 26 p. (Boletim técnico, 6).

ALVAREZ, A. C. C. **Produção do arroz em função da adubação com silício e nitrogênio no sistema de sequeiro e irrigado por aspersão**. 2004. 70 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

ARCHAMBAULT, D. J.; ZHANG, G.; TAYLOR, G. J. Accumulation of Al in root mucilage of an Al-resistant and Al-sensitive cultivar of wheat. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 112, p. 1471-1478, 1996.

ASSIS, M. P. et al. Limitações nutricionais para a cultura do arroz em solos orgânicos sob inundação. I. crescimento. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, p. 87-95, 2000.

BALDEON, J. R. M. **Efeito da ação alcalinizante e da competição entre silicato e fosfato na eficiência do termofosfato magnesiano em solos ácidos**. 1995. 85 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

BARBOSA FILHO, M. P. et al. Resposta do arroz de sequeiro à aplicação de silício. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 23., 1998, Caxambu. **Anais...** Lavras: Universidade Federal de Lavras; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Sociedade Brasileira de Microbiologia, 1998. p. 57.

BARBOSA FILHO, M. P. et al. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 325-330, 2001.

BARBOSA FILHO, M. P. **Nutrição e adubação do arroz**: sequeiro e irrigado. Piracicaba: Potafos, 1987. 129 p. (Boletim técnico, 9).

BARCELO, J.; GUEVARA, P.; POSCHENRIEDER, C. Silicon amelioration of aluminium toxicity in teosinte (*Zea mays* L. ssp. mexicana), **Plant and Soil**, The Hague, v. 154, p. 249-255, 1993.

BAYLIS, A. D. et al. Effect of silicon on the toxicity of aluminum to soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, p. 537-546, 1994.

BENEDITO, D. S. **Interação boro x silício na nutrição, crescimento e produção do arroz**. 2004. 62 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

BENINNI, E. R. Y.; TAKAHASHI, H. W.; NEVES, C. S. V. J. Manejo do cálcio em alface de cultivo hidropônico. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, p. 605-610, 2003.

BERTSCH, P. M.; PARKER, D. R. Aqueous polynuclear aluminum species. In: SPOSITO, G. (Coord.). **The environmental chemistry of aluminum**. Boca Raton : CRC Press, 1995. p. 117-168.

BLOOM, P. R.; ERICH, M. S. The quantitation of aqueous aluminum. In: SPOSITO, G. (Coord.). **The Environmental chemistry of aluminum**. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 1996. p. 1-38.

BOHNEN, H. Acidez do solo: origem e evolução. In: KAMINSKI, J. (Coord.). **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 2000. p. 9-19. (Boletim, 4).

BRASIL. Decreto lei n. 2954, de 16 de janeiro de 1980. Aprova o regulamento da lei nº 6894 que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências. **Normas Jurídicas**, DEC 004954, p. 27, 14 jan. 2004.

BRESEGHELLO, F.; CASTRO, E. M.; MORAIS, O. P. Cultivares de arroz. In: BRESEGHELLO, F.; STONE, L. F. (Coords.). **Tecnologia para arroz de terras altas**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1998. p. 41-53.

BRONDANI, C.; PAIVA, E. Análise de RFLP da tolerância à toxidez do alumínio no cromossomo 2 do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, p. 575-579, 1996.

CAMARGO, C. E. O.; FERREIRA FILHO, A. W. P.; FREITAS, J. G. de. Avaliação de genótipos de centeio, triticale e trigo comum e trigo duro quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, p. 227-232, 1998.

CARVALHO, J. C. **Análise de crescimento e produção de grãos da cultura do arroz irrigado por aspersão em função da aplicação de escórias de siderurgia como fonte de silício**. 2000. 119 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

CARVALHO, J. R. P. et al. Resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo em solos dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, p. 61-67, 2003.

CARVALHO, M. A. C. et al. Desenvolvimento vegetativo de plantas e qualidade fisiológica de sementes de arroz produzidas em áreas de recuperação de pastagem. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, DF, v. 31, p. 9-16, 2009.

CARVALHO, R. et al. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 3, p. 557-565, 2001.

CARVALHO, W. A.; ESPINDOLA, C. R.; PACOLA, A. A. Levantamento de solos da Fazenda Lageado: Estação Experimental "Presidente Médici". **Boletim Científico da Faculdade de Ciências Agronômicas UNESP**, Botucatu, n. 1, 1983. 95 p.

CLARK, R. B. et al. Effect of trace element deficiencies and excesses on mineral nutrients in sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 3, p. 357-374, 1981.

CLARKSON, D. T. Interactions between aluminium and phosphorus on root surfaces and cell wall material, **Plant and Soil**, The Hague, v. 27, p. 347-356, 1967.

COCKER, K. M.; EVANS, D. E.; HODSON, M. J. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants: solution chemistry or an in planta mechanism. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 104, p. 608-614, 1998.

COPELAND, L.; DELIMA, M.L. The effect of aluminium on enzyme activities in wheat roots. **Journal Plant Physiology**, Washington, DC, v. 140, p. 641-645, 1992.

CORRALES, I.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Influence of silicon pretreatment on aluminum toxicity in maize roots. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 190, p. 203-209, 1997.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon on agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. 403 p.

DELHAIZE, E. et al. Aluminium tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) I: uptake and distribution of aluminum in root apices. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 103, p. 685-693, 1993a.

DELHAIZE, E.; P. R. RYAN, P. R.; RANDALL, P. J. Aluminium tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) II: aluminum-stimulated excretion of malic acid from root apices. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 103, p. 695-702, 1993b.

DELHAIZE, E.; RYAN, P.R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 107, p. 315-321, 1995.

DEREN, C. Plant genotypes, silicon concentration and silicon related responses. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Coords.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 149-158.

DEREN, C.W. et al. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. **Crop Science**, Madison, v. 34, p. 733-737, 1994.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivares de arroz**. 2010A. Disponível em : <<http://www.cnpaf.embrapa.br/pesquisa/brstalentto.htm>>. Acesso em: 3 ago. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivares de arroz**. 2010b. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br/arroz/guarani.htm>>. Acesso em: 3 ago 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivo do arroz de terras altas: cultivares**. 2011. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/cultivares.htm>>. Acesso em: 23 jan. 2011.

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

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

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

FAGERIA, N. K. **Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz**. Goiânia: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão, 1984a. 341 p.

FAGERIA, N. K. et al. Nutrição de fósforo na produção de arroz de terras altas. In: YAMADA, T.; ABADÍA, S. R. S. (Coords.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafós, 2004. p. 405-418.

FAGERIA, N. K. Resposta de cultivares de arroz à aplicação de calcário em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, p. 883-889, 1984b.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. **Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 42 p.

FALLAH, A. Study of the effect of silicon on lodging parameters in rice plants under hydroponics culture in a greenhouse experiment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SILICON IN AGRICULTURE, 4., 2008, South Africa. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.siliconconference.org.z.php>>. Acesso em: 30 nov. 2008.

FARIA, R. J. **Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 47 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

FAWE, A. et al. Silicon and disease resistance in dicotyledons. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Coords.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 159-170.

FERNÁNDEZ, S. et al. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. **International Journal of Remote Sensing**, New York, v. 15, p. 1867-1884, 1994.

FERREIRA, R. P. et al. Identificação de cultivares de arroz tolerantes à toxidez de alumínio por técnica multivariada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, p. 789-795, 1995.

FISCHER, R. G. et al. Efeito do calcário e fontes de silício sobre a toxidez de ferro em arroz irrigado. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 43, p. 6-10, 1990.

FLEMING, A. L.; SCHWARTZ, J. W.; FOY, C. D. Soil: aluminium toxicity in plants, **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, p. 715-719, 1974.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 589 p.

FOY, C. D. et al. Differential aluminum tolerance of two varieties associated with plant-induced pH changes around their roots. **Soil Science Society Proceedings**, Madison, v. 29, p. 64-67, 1965.

FOY, C. D. Plant adaptation to acid aluminum-toxic soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, p. 959-987, 1988.

FOY, C. D.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 29, p. 511-566, 1978.

FREITAS, F. A. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 72-79, 2006.

FURLANI, A. M. C.; BATAGLIA, O. C.; AZZINI, L. E. Variabilidade entre linhagens de arroz na absorção e utilização de potássio em solução nutritiva. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, p. 135-141, 1986.

FURLANI, P. R.; CLARK, R. B. Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solution. **Agronomy Journal**, Madison, v. 73, p. 587-594, 1981.

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).

GALVEZ, L. et al. Silicon interactions with manganese and aluminium toxicity in sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 10, p. 1139-1147, 1987.

GALVEZ, L.; CLARK, R. B. Effects of silicon on growth and mineral composition of sorghum (*Sorghum tricolor*) grown with toxic levels of aluminium. In: WRIGHT, R.J.; BALIGAR, V.C.; MURRMANN, R.P. (Coord.). **Plant-soil interaction at low pH**. Dordrecht: Kluwer, 1991. p. 815-823.

GANESAN, K.; SANKARANARAYANAN, C.; BALAKUMAR, T. Physiological basis of differential aluminum tolerance in rice genotypes. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 24, p. 2179-2191, 1993.

GU, M. H.; KOYAMA, H.; HARA, T. Effects of silicon supply on amelioration of aluminum injury and chemical forms of aluminum in rice plants. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokio, v. 69, p. 498-505, 1998.

GUNES, A. et al. Silicon increases boron tolerance and reduces oxidative damage of wheat grown in soil with excess boron. **Biologia Plantarum**, Praha, v. 51, p. 571-574, 2007.

HAMMOND, K. E.; EVANS, D. E.; HODSON, M. J. Aluminum/silicon interactions in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings. **Plant and soil**, Dordrecht, v. 173, p. 89-95, 1995.

HARA, T.; GU, M. H.; KOYAMA, H. Ameliorative effect of silicon on aluminum injury in the rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 45, p. 929-936, 1999.

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

HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. Aluminium /silicon interactions in conifers. **Journal Inorganic Biochemical**, Chicago, v. 76, p. 89-98, 1999.

HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. The interaction between silicon and aluminium in *Sorghum bicolor* (L.) Moench: growth analysis and X-ray microanalysis. **Annals of Botany**, Oxford, v. 72, p. 389-400, 1993.

HORST, W. J.; PUSCHEL, A. K.; SCHMOHL, N. Induction of callose formation is a sensitive marker for genotypic aluminium sensitivity in maize. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 192, p. 23-30, 1997.

HOSSAIN, K. A.; HORIUCHI, T.; MIYAGAWA, S. Effects of silicate materials on growth and grain yield of rice plants grown in clay loam and sandy loam soils. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, p. 1-13, 2001.

HUANG, J. W. et al. Aluminum interactions with voltage-dependent calcium transport in plasma membrane vesicles isolated from roots of aluminum-sensitive and -resistant wheat cultivars. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 110, p. 561-569, 1996.

HUANG, P. M.; VIOLANTE, A. Influence of organic acids on crystallization and surface properties of precipitation products of aluminum. In: HUANG, P. M.; SCHNITZER, M. (Coords.). **Interactions of soil minerals with natural organic and microbes**. Madison: Soil Science of America, 1986. p. 159-221.

HUE, N. V.; AMIEN, I. Aluminum detoxification with green manures. **Communication Soil Science Plant Analysis**, New York, v. 20, p. 1499-1511, 1989.

HUE, N. V.; CRADDOCK, G. R.; ADAMS, F. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 5, p. 28-34, 1986.

HUE, N. V.; LICUDINE, D. L. Amelioration of subsoil acidity through surface application of organic manures. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 28, p. 623-632, 1999.

JO, J. et al. Isolation of *ALU1-P* gene encoding a protein with aluminum tolerance activity from arthrobacter viscosus. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, Korea, v. 239, p. 835-839, 1997.

JONES, D. L.; KOCHIAN, L. V. Aluminum inhibition of the inositol 1,4,5-triphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role of aluminum toxicity. **Plant Cell**, Baltimore, v. 7, p. 1913-1922, 1995.

JORGE, R. A.; ARRUDAS, P. Aluminum-induced organic acids exudation by roots of aluminum-tolerant tropical maize. **Phytochemistry**, Oxford, v. 45, p. 675-681, 1997.

KIDD, P. S. et al. The role of root exudates in aluminum resistance and silicon induced amelioration of aluminum toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 52, p. 1339-1352, 2001.

KINRAIDE, T. B. Identify of the rhizotoxic aluminum species. In: WRIGTH, R. J.; BALIGAR, V. C.; MURRMANN, R. P. (Coords.). **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer, 1991. p. 717-728.

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.

KORNDÖRFER, G.H. et al. Cimento como fonte de silício para cana de açúcar. **Revista STAB**, Piracicaba, v. 19, p. 30-33, 2000.

KORNDÖRFER, G. H. **Análise de silício**: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 39 p. (Boletim técnico, 2).

KORNDÖRFER, G. H. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M. S. (Coord.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 355-374.

KORNDÖRFER, G. H. et al. Avaliações de métodos de avaliações de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 101-106, 1999a.

KORNDÖRFER, G. H. et al. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, p. 1071-1084, 2001.

KORNDÖRFER, G. H. et al. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 635-41, 1999b.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. 2. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Ciências Agrárias, 2003. 15 p. (Boletim técnico, 1)

LEITE, P. C. **Interação silício-fósforo em Latossolo-Roxo cultivado com sorgo em casa-de-vegetação**. 1997. 87 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

LI, Y. C.; ALVA, A. K.; SUMNER, M. E. Response of cotton cultivars to aluminum in solutions with varying silicon concentrations. **Journal of Plant Nutrition**. New York, v. 12, p.881-892, 1989.

LIANG, Y.C. et al. Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, p. 2285-97, 1994.

LIMA FILHO, O. F.; LIMA, M. T. G.; TSAI, S. M. O silício na agricultura. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 87, p. 1-7, 1999. Encarte Técnico: Informe Agrônômico.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos de química do solo**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001. 182 p.

LUGANY, M.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Monitoring of aluminum induced inhibition of root elongation in four maize cultivars differing in tolerance to aluminum and proton toxicity. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 93, p. 265-271, 1995.

LUX, A. et al. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 115, p. 87-92, 2002.

MA, J. F.; NISHIMURA, K.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of rice plant at different growth stages. **Soil Science and Plant Nutrition**, New York, v. 35, p. 347-356, 1989.

MA, J. F.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Aluminium Tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 6, p. 273-279, 2001.

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

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

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

MACHADO, J. R. **Desenvolvimento da planta e produtividade de grãos de populações de arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado por inundação em função de épocas de cultivo**. 1994. 237 p. Tese (Livro Docência)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1994.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 215 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípio e aplicações**. 2. ed. Piracicaba : Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 315 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminium toxicity and tolerance in higher plants. **International Review of Cytology**, San Diego, v. 200, p. 1-46, 2000.

MATSUMOTO, H. et al. Localization of aluminum in tea leaves. **Plant Cell Physiology**, Kyoto, v. 17, p. 627-631, 1976.

MATSUSHIMA, S. **Crop science in rice: theory of yield determination and its application**. Tokyo: Fuji, 1970. 379 p.

MAUAD, M. **Desenvolvimento e marcha de absorção de silício em plantas de arroz sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada**. 2006. 107 p. Tese (Doutorado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

MAUAD, M. et al. 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, p. 867-873, 2003.

MEDEIROS, R. D. **Primavera e bonança: novas cultivares de arroz de sequeiro para o Estado de Roraima**. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2000. 5 p. (Comunicado técnico, 4).

MEHARG, A. A. The role of the plasmalemma in metal tolerance in angiosperms, **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 88, p. 191-198, 1993.

MELO, S. P. **Silício e fósforo para o estabelecimento do Capim-Marandu num Latossolo Vermelho-Amarelo**. 2005. 123 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MENDONÇA, R. J. et al. Capacidade de cultivares de arroz de modificar o pH de soluções nutritivas na presença de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, p. 447-452, 2005.

MENDONÇA, R. J. et al. Efeito do alumínio na absorção e na utilização de macronutrientes em duas cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, p. 843-846, 2003.

MENGEL, K. E.; KIRKBY, G. A. Further elements of importance. In: _____. **Principles of plant nutrition**. 4th ed. Bern: International Potash Institute, 1987. p. 573-588.

MIYASAKA, S. C. et al. Mechanism of aluminum tolerance in snapbeans: root exudation of citric acid. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 96, p. 737-743, 1991.

MIYASAWA, M.; CHIERICE, G. O.; PAVAN, M. A. Amenização da toxicidade de alumínio à raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 209-215, 1992.

MORIKAWA, C. K.; SAIGUSA, M. Si amelioration of Al toxicity in barley (*Hordeum vulgare* L.) growing in two Andosols. **Plant and Soil**, The Hague, v. 240, p.161-168, 2002.

NICHOL, B. E.; OLIVEIRA, L. A. Effects of aluminium on the growth and distribution of calcium in roots of an aluminium-sensitive cultivar of barley (*Hordeum vulgare*), **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 73, p. 1849-1858, 1995.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J. et al. (Coord.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília, DF: Embrapa, SEA, 1991. p. 189-253. (Documentos, 3)

OBIHARA, C. H.; RUSSEL, E. W. Specific adsorption of the silicate and phosphate by soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 23, p. 105-117, 1972.

OLIVEIRA, I. P.; OLIVEIRA, L. C. **Sintomas de deficiência de cálcio e magnésio na planta de nim**. Montes Belos: Faculdade Montes Belos (FMB), 2009. Disponível em: <http://www.fmb.edu.br/ler_artigo.php?artigo=279>. Acesso em : 20 nov. 2009.

OLIVEIRA, M. G. A. **Determinação, adsorção e deslocamento recíproco de silício e fósforo em Latossolos do Triângulo Mineiro**. 1984. 68 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.

PELLET, D. M.; GRUNES, D. L.; KOCHIAN, L. V. Organic acid exudation as an aluminum-tolerance mechanism in maize (*Zea mays* L.). **Planta**, New York, v. 196, p. 788-795, 1995.

PEREIRA, H. S.; VITTI, G. C.; KORNDORFER, G. H. Comportamento de diferentes fontes de silício no solo e na cultura do tomateiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 101-108, 2003.

PIÑEROS, M. A. et al. The Physiology and Biophysics of an Aluminum Tolerance Mechanism Based on Root Citrate Exudation in Maize. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 129, p. 1194-1206, 2002.

PINHEIRO, B. S. Características morfofisiológicas da planta relacionada à produtividade. In: VIEIRA, N. R. de A.; SANTOS, A. B. dos; SANT'ANA, E. P. (Eds.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. p. 116-147.

RAHMAN, M. T. et al. Varietal differences in the growth of rice plants in response to aluminum and silicon. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 44, p. 423-431, 1998.

RAIJ, B. van et al. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, n. 100, 1996. 2. ed. 285 p.

REIS, M. A. et al. Aplicação de silício em arroz de terras altas irrigado por aspersão. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, p. 37-43, 2008.

ROSSIELLO, R. O. P.; JACOB NETTO, J. Toxidez de Alumínio em plantas: novo enfoque para um velho problema. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 375-418.

ROUT, G. R.; SAMANTARAY, S.; DAS, P. Aluminium toxicity in plants: a review. **Agronomie**, Paris, v. 21, p. 3-21, 2001.

RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; JONES, D. L. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 52, p. 527-560, 2001.

RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; RANDALL, P. J. Characterization of Al-stimulated efflux of malate from the apices of Al-tolerant wheat roots. **Planta**, New York, v. 74, p. 103-110, 1995.

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

SANGSTER, A. G.; HODSON, M. L. Silicon and aluminium deposition in the cell wall phytoliths of gymnosperm leaves. In: MEUNIER, J. D.; COLIN, F. A. A. (Coord.). **Phytoliths: applications in earth science and human history**. Rotterdam: A A Balkema, 2001. p. 343-355.

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.

SAWAZAKI, E.; FURLANI, P. R. Genética da tolerância ao alumínio em linhagens de milho cateto. **Bragantia**, Campinas, v. 46, p. 269-278, 1987.

SCHMIDT, R. E.; ZHANG, X.; CHALMERS, D. R. Response of photosynthesis and superoxide dismutase to silica applied to creeping bentgrass grown under two fertility levels. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, p. 1763-1773, 1999.

SCHROEDER, J. I. et al. Guard cell signal transduction. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 52, p. 627-658, 2001.

SILVA, J. B. C.; NOVAIS, R. F.; SEDIYAMA, C. S. Comportamento de genótipos de soja em solos com alta saturação de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, p. 287-289, 1984.

SILVA, L. M. **Crescimento radicular e absorção de nutrientes de cultivares de arroz submetidos ao alumínio em solução nutritiva**. 2007. 103 p. Tese (Doutorado em Agronomia)-Faculdades de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

SIMMONS, C. R. et al. Structure of a rice beta- glucanase gene regulated by ethylene, cytokinin, wounding, salicylic acid and fungal elicitors. **Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 18, p. 33-45, 1992.

SIVAGURU, M. et al. Aluminum-induced 1,3-b -D-glucan inhibits cell-to-cell trafficking of molecules through plasmodesmata. A new mechanism of aluminum toxicity in plants. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 124, p. 991-1005, 2000.

SIVAGURU, M. et al. Characterization of differential aluminum tolerance among rice genotypes cultivated in south india. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 15, p. 236-246, 1992.

SIVAGURU, M.; HORST, W. J. The distal part of the transition zone is the most aluminum-sensitive apical root zone of maize. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 116, p. 155-163, 1998.

SIVAGURU, M.; PALIWAL, K. Differential aluminum tolerance in some tropical rice cultivars II: mechanism of aluminum tolerance. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, p. 1717-1732, 1993.

SLASKI, J. J. Response of calmodulin-dependent and calmodulin-independent NAD kinase to aluminium in root tips from various cultivated plants. **Journal Plant Physiology**, Stuttgart, v. 136, p. 40-44, 1990.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. São Paulo: Artimed, 2009. 819 p.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T. et al. (Coord.). **Science of the rice plant physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Police Research Center, 1995. p. 420-433.

TANAKA, A. et al.. Comparison of toxicity to plants among Al^{3+} , $AlSO_4^+$, and Al-F complex ions. **Soil Science and Plant Nutrition**, New York, v. 33, p. 43-44, 1987.

TANAKA, A.; PARK, Y. D. Significance of the absorption and distribution of silica in the growth of rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, New York, v. 12, p. 23-28, 1966.

TAYLOR, G. J. Overcoming barriers to understanding the cellular basis of aluminium resistance. In: DATE, R. A. et al. (Coord.). **Plant soil interactions at low ph: principles and management**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1995. p. 255-269.

TAYLOR, G. J. The physiology of aluminium tolerance in higher plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, p. 1179-1194, 1988.

TERRES, A. L. S. et al. Melhoramento genético e cultivares de arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. (Coord.). **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 161-226.

TRENHOLM, L. E. et al. Influence of silica on growth, quality, and wear tolerance of seashore paspalun. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, p. 1763-1773, 1999.

VAHL, L. C. **Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento**. 1991. 173 p. Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

VASCONSELOS, S. S.; ROSSIELLO, R. O. P.; JACOBINE NETO, J. Parâmetros morfológicos para estabelecer tolerância diferencial à toxicidade de alumínio em cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, p. 357-363, 2002.

VENTURIN, N. et al. Adubação mineral de angico-amarelo (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, p. 441-448, 1999.

VERMAS, T. S.; MINHAS, R. S. Effect of iron and manganese interaction on paddy yield and iron and manganese nutrition in silicon-treated and untreated soil. **Soil Science**, The Hague, v. 147, p. 107-115, 1989.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 91-96, 1984.

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M. S. (Coord.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 299-326.

WALLACE, A. Relationships among nitrogen, silicon, and heavy metal uptake by plants. **Soil Science**, The Hague, v. 147, 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, p. 529-530, 1976.

WANG, M. Y. et al. Ammonium uptake by rice roots. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 103, p. 1249-1258, 1993.

WANG, Y.; 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, p. 3762-3770, 2004.

WINSLOW, M. D. Silicon, disease resistance, and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. **Crop Science**, Madison, v. 32, p. 1208-13, 1992.

WRIGHT, R.J. Soil aluminum toxicity and plant growth. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 20, p. 1479-1497, 1989.

YAMAMOTO, Y.; HOBAYASHI, Y.; MATSUMOTO, H. Lipid peroxidation is an early symptom triggered by aluminum, but not the primary cause of elongation inhibition in pea roots. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 125, p. 199-208, 2001.

YERMIYAHU, U. et al. Binding and electrostatic attraction of lanthanum (La^{3+}) and aluminum (Al^{3+}) to wheat root plasma membranes. **Journal of Membrane Biology**, New York, v. 159, p. 239-252, 1997.

YOKOYAMA, L. P. O arroz no Brasil de 1985/86 a 1999/00: aspectos conjunturais. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 7., Florianópolis, 2002. **Anais...** Florianópolis: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 96-99.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños : IRRI, 1981. 269 p.
ZEIGER, E. Sensory transduction of blue light in guard cells. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 5, p. 183-185, 2000.

ZHANG, G.; HODDINOTT, J.; TAYLOR, G. J. Characterization of 1,3 b glucan (callose) synthesis in roots of *Triticum aestivum* in response to aluminum toxicity. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 144, p. 229-234, 1994.

ZHANG, W. H.; RENGEL Z. Aluminium induces an increase in cytoplasmic calcium in intact wheat root apical cells. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 26, p. 401-409, 1999.

ZHENG, S. J.; MA, J. F.; MATSUMOTO, H. High aluminum resistance in buckwheat. I. Al – induced specific secretion of oxalic acid from root tips. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 117, p. 745-751, 1998.