

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**RESPOSTA DE CULTIVARES DE MILHO AO ALUMÍNIO SOB DOSES
DE SILÍCIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

LIANA RODRIGUES TAVARES COSTA

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

BOTUCATU-SP

Janeiro – 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**RESPOSTA DE CULTIVARES DE MILHO AO ALUMÍNIO SOB DOSES
DE SILÍCIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

LIANA RODRIGUES TAVARES COSTA

Orientador: Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes

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

BOTUCATU - SP

Janeiro – 2012

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

C837r Costa, Liana Rodrigues Tavares, 1973-
Resposta de cultivares de milho ao alumínio sob doses de silício em solução nutritiva / Liana Rodrigues Tavares Costa. - Botucatu : [s.n.], 2012
xi, 85 f. : gráfs., tabs., fots. color.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2012

Orientador: Dirceu Maximino Fernandes
Inclui bibliografia

1. Alumínio. 2. Fenóis. 3. Milho - Raízes. 4. Plantas - Nutrição. 5. Silício na agricultura. I. Fernandes, Dirceu Maximino. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

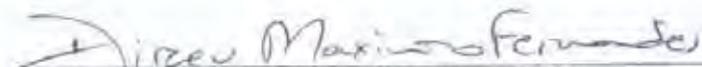
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "RESPOSTA DE CULTIVARES DE MILHO AO ALUMÍNIO SOB DOSES
DE SILÍCIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA"

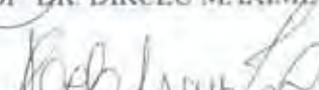
ALUNA: LIANA RODRIGUES TAVARES COSTA

ORIENTADOR: PROF. DR. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

Aprovado pela Comissão Examinadora



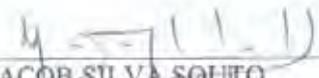
PROF. DR. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES



PROF. DR. HELIO GRASSI FILHO



PROFA. DRA. GIUSEPPINA PACE PEREIRA LIMA



PROF. DR. JACOB SILVA SOUTO



PROFA. DRA. ANELISA DE AQUINO VIDAL

Data da Realização: 24 de fevereiro de 2012.

DEDICO

Aos meus pais

João Wilson Rodrigues da Costa

Iú Rodrigues Tavares Costa

A minha irmã

Lara Rodrigues Tavares Costa

Ao meu noivo

Paulo Renato de Oliveira Gavião

Por toda ajuda, compreensão, amor, companheirismo e carinho que recebi nessa etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes, pelo incentivo, orientação, dedicação, ensinamentos, compreensão, confiança e amizade.
- Aos meus tios, que sempre torceram e acreditaram em mim.
- Aos meus amigos sempre presentes que me ajudaram nessa etapa tão difícil, com muito carinho, amor e amizade.
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante o decorrer do curso.
- Aos professores do Departamento de Recursos Naturais – Área Ciência dos Solos e do Departamento de Produção Vegetal – Setor Agricultura, por permitirem o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.
- À professora Giuseppina e aos colegas do laboratório que permitiram e me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.
- À todos os funcionários do Departamento de Recursos Naturais – Área Ciência dos Solos, sem exceção, pela ajuda e carinho.
- Aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal – Setor Agricultura, em especial, Lana, Valéria e Vera, pelo auxílio no desenvolvimento do projeto, carinho e amizade.
- Aos funcionários da seção de Pós Graduação, pela atenção, paciência e ajuda.
- Aos funcionários da biblioteca ‘Paulo de Carvalho Mattos’, pela ajuda e disposição.
- A todos aqueles que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
1 RESUMO	01
2 SUMMARY	03
3 INTRODUÇÃO	05
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	07
4.1 A cultura do milho	07
4.2 Alumínio no solo	08
4.3 Alumínio na planta	09
4.4 Silício na solução do solo	11
4.5 Silício na planta	12
4.6 Alumínio e o silício	14
4.7 Compostos fenólicos	15
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
5.1 Localização dos experimentos e clima.....	18
5.2 Delineamento experimental.....	18
5.3 Características das cultivares.....	18
5.4 Instalação e condução dos experimentos	19
5.5 Parâmetros avaliados nos experimentos	22
5.5.1 Comprimento das raízes e parte aérea	22
5.5.2 Massa fresca e seca da raiz e parte aérea	22
5.5.3 Teores de nutrientes, Si e fenóis solúveis totais na raiz e parte aérea	22
5.5.4 Quantidade acumulada de nutrientes, Si e fenóis na raiz e parte aérea.....	23

5.6 Análise estatística.....	23
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
6.1 Comprimento das raízes.....	24
6.2 Comprimento da parte aérea.....	27
6.3 Massa fresca e seca da raiz.....	29
6.4 Massa fresca e seca da parte aérea.....	31
6.5 Teor e acúmulo de silício na raiz.....	33
6.6 Teor e acúmulo de silício na parte aérea.....	35
6.7 Teor e acúmulo de fenóis solúveis totais na raiz.....	37
6.8 Teor e acúmulo de fenóis solúveis totais na parte aérea.....	39
6.9 Teor e acúmulo de nutrientes na raiz e parte aérea.....	41
6.9.1 Nitrogênio.....	41
6.9.2 Fósforo.....	45
6.9.3 Potássio.....	48
6.9.4 Cálcio.....	51
6.9.5 Magnésio.....	54
6.9.6 Enxofre.....	57
6.9.7 Boro.....	59
6.9.8 Cobre.....	63
6.9.9 Ferro.....	66
6.9.10 Manganês.....	68
6.9.11 Zinco.....	70
7 CONCLUSÕES.....	74
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Composição da solução estoque e solução nutritiva utilizada para estudo de resposta de cultivares de milho ao alumínio sob doses de silício em solução nutritiva.....	20
Tabela 2: Comprimento da raiz no período inicial (com Si e sem Al) e final (com Al e sem Si), nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.....	25
Tabela 3: Comprimento da parte aérea no período inicial (com Si e sem Al) e final (com Al e sem Si), nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.....	28
Tabela 4: Massa fresca e seca da raiz, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.....	30
Tabela 5: Massa fresca e seca da parte aérea, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.....	32
Tabela 6: Teor e acúmulo de Si na raiz, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.....	34
Tabela 7: Teor e acúmulo de Si na parte aérea, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.....	36
Tabela 8: Teor e acúmulo de fenóis na raiz, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.....	38
Tabela 9: Teor e acúmulo de fenóis na parte aérea, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.	40
Tabela 10: Teor e acúmulo dos nutrientes na raiz, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si e Al nas cultivares duas cultivares de milho.	42
Tabela 11: Teor e acúmulo dos nutrientes na parte aérea, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si e Al nas cultivares de milho.	43

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Condução do experimento. A) Duas plântulas por furo; (B) Bancada do experimento; (C) Solução nutritiva com aeração; (D) plântula com 5 dias de germinação.....	21
Figura 2. Comprimento da raiz no período inicial ((A) e (B)) e final ((C) e (D)), no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante Al^{3+}). Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com Si).....	26
Figura 3. Comprimento da parte aérea no período inicial ((A) e (B)) e final ((C) e (D)), nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....	29
Figura 4. Massa fresca ((A) e (B)) e seca ((C) e (D)) da raiz, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....	31
Figura 5. Massa fresca ((A) e (B)) e seca ((C) e (D)) da parte aérea, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....	32
Figura 6. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de Si, na raiz, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....	35
Figura 7. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de Si, na parte aérea, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível	

ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....36

Figura 8. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de fenóis, na raiz, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....38

Figura 9. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de fenóis, na parte aérea, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....40

Figura 10. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de N na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de N, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....44

Figura 11. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de P na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de P, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....47

Figura 12. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de K na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de K, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....50

Figura 13. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de Ca na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de Ca, na parte aérea, no primeiro e

segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....53

Figura 14. . Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de Mg, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de Mg, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....56

Figura 15. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de S, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de S, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....58

Figura 16. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de B, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de B, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....62

Figura 17. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de Cu, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de Cu, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....65

Figura 18. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de Fe, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de Fe, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....67

Figura 19. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de Mn, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de Mn, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com silício em solução).....69

Figura 20. Médias dos teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de Zn, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de Zn, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de Si nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de Al. Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).....72

1 RESUMO

O silício é considerado como elemento benéfico para as plantas, possuindo papel de resistência às plantas que tem sido particularmente atribuído à modificação nas propriedades da parede celular trazendo benefícios contra a ação deletéria do alumínio. Dois experimentos foram realizados com o objetivo de verificar o possível efeito de doses crescentes de silício contra a ação deletéria do Al^{3+} em duas cultivares de milho modificando o tempo de exposição das raízes em solução nutritiva contendo Si. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação no Departamento de Recursos Naturais/ Área Ciência do Solo, FCA/UNESP, Botucatu-SP, utilizando vasos de plástico com capacidade de 4,5 litros de solução. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com três repetições, constituindo-se de um fatorial 4x2, com quatro doses (0, 1, 2 e 4 $mmol L^{-1}$ de Si) e as variedades, Exceler - sensível e AG8060 – tolerante ao Al^{3+} . Após cada período de contato com Si o Al^{3+} foi adicionado em solução permanecendo por dez dias. Os seguintes parâmetros foram avaliados: comprimento no período inicial e final, massa fresca e seca, teor e acúmulo dos nutrientes, Si e fenóis solúveis totais da raiz e parte aérea das duas cultivares de milho. A cultivar Exceler em contato com Al^{3+} em solução apresentou menor desenvolvimento radicular quando comparada com a cultivar AG8060 mesmo sob influência do Si. A maior massa fresca

e seca na raiz foi encontrada na cultivar AG8060 e a maior massa fresca e seca na parte aérea foi encontrada na cultivar Exceler, mesmo sendo sensível ao Al^{3+} . O teor e acúmulo de Si na raiz foi maior na cultivar Exceler mostrando ser mais eficiente na absorção desse elemento. Quando as plantas ficaram maior tempo em contato com Si em solução no primeiro experimento, o acúmulo de fenóis nas cultivares foi quase o dobro do acúmulo obtido pelas cultivares no segundo experimento, provavelmente essa diferença no acúmulo ocorreu devido ao maior tempo que as plantas ficaram em contato com o Si no primeiro experimento. E a presença do Si em solução, além de impedir a ação deletéria do Al^{3+} aumentou a produção de fenóis com o aumento da dose aplicada obtendo a dose ideal. A cultivar Exceler adquiriu maior teor na raiz de S, B, Cu, Fe e Mn no primeiro experimento e a cultivar AG8060 adquiriu maior teor e acúmulo na raiz e maior teor na parte aérea de N, P, K, Ca, Mg e Zn nos dois experimentos mostrando ser cultivares mais eficiente em absorver e acumular determinado elemento.

Palavras chaves: Sistema radicular, acúmulo de nutrientes, Fenóis

RESPONSE OF CORN CULTIVARS TO ALUMINUM UNDER DOSES OF SILICON TAKEN IN NUTRITIVE SOLUTION. Botucatu, 2012. 85p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: LIANA RODRIGUES TAVARES COSTA

Adviser: DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

2 SUMMARY

Silicon is considered as a beneficial element for plants. It has a great role in plants particularly attributed to changes in the properties of the cell wall bringing benefits against the deleterious action of aluminum. Two experiments were carried out with the aim to verify the possible effects of increasing doses of silicon against the deleterious action of Al^{3+} in two cultivars of corn. It was changed the root exposure time in nutritive solution containing Si. The experiments were carried out in a greenhouse of Department of Natural Resources – Soil Science, School of Agronomical Sciences – FCA/UNESP, located in Botucatu-SP. Were utilized plastic vessels with 4,5 liters of solution. The experimental design was in a randomized blocks with three replications. It was taken a 4x2 factorial, with four doses (0, 1, 2 and 4 $mmol L^{-1}$ Si) and two varieties of corn - sensitive and tolerant to Al^{3+} . After ending each period of contact with Si, it was added the Al^{3+} in solution, remaining for 10 days. Were evaluated the following parameters: length of plants at the initial and end periods, fresh and dry matter, content and accumulate of essential nutrients and Si and total soluble phenols in root and aerial part of both cultivars of corn. Exceler cultivar in the presence of Al^{3+} in solution presented less root development when compared to AG8060 cultivar even under influence of Si. The highest fresh and dry matter in roots was noted in AG8060 cultivar, and the highest fresh and dry matter in aerial part was noted in Exceler cultivar even being sensitive to Al^{3+} . Si content and accumulate in root were higher in Exceler cultivar. It shows

that it is more efficient on Si absorption. Accumulate of phenols in root in Exceler cultivar and content and accumulate of phenols in aerial part of AG8060 cultivar increased according to the doses of Si up to reach maximum value to get the best dose. In the first experiment, when plants were submitted to a higher time of contact with Si contained in solution, the phenols accumulate in both cultivars almost doubled when compared to that one obtained by the cultivars in the second experiment. Probably, it occurred due to a higher time of contact between plants and Si in the first experiment. The presence of Si in solution avoided the deleterious action of Al^{3+} and, furthermore, increased the production of phenols due to the increase of doses of Si to reach maximum value to get the best one. Exceler cultivar presented higher content of S, B, Cu, Fe and Mn in roots only in the first experiment, while AG8060 cultivar presented higher content and accumulate in roots and aerial part of N, P, K, Ca, Mg and Zn in both experiments. It can be concluded that AG8060 cultivar is the most efficient in absorbing certain element.

Keywords: Root System, Nutrient Accumulate, Phenols

3 INTRODUÇÃO

A acidez do solo é reconhecida como uma das principais causas das limitações da cultura do milho (BORGONNOVI et al., 1987). Sabe-se que a ocorrência de toxidez por alumínio (Al^{3+}) é bastante representativa nos solos brasileiros, que além de altos índices de acidez, apresentam baixos teores de P, Ca e Mg (OLMOS e CAMARGO, 1976). A toxicidade do Al^{3+} é um dos principais fatores que limita o crescimento da planta e conseqüentemente afeta a produção da cultura. Horst (1995) focalizou seus estudos na toxidez do Al^{3+} no apoplasto e observou que em curto prazo inibe o alongamento da raiz.

Na litosfera, o Si é considerado o mais abundante e estável elemento químico, entretanto, sob condições específicas pode ser dissolvido, absorvido e transportado pelas plantas (KORNDÖRFER, 2006). Os mecanismos que envolvem a absorção e o transporte de Si pelas plantas são muito complexos, dependendo não somente das espécies envolvidas, mas também do suprimento (LIANG et al., 2007). O Si é um elemento mineral benéfico para as plantas (EPSTEIN, 1999). O papel do Si na resistência da planta contra o estresse biótico e abiótico tem sido particularmente atribuído à modificação nas propriedades da parede celular (LUX et al., 2002). Ma et al. (1997) sugeriram que a melhoria no efeito do Si na toxicidade do Al^{3+} é devido a formação do complexo Al-Si que resulta em um decréscimo

na concentração do Al^{3+} tóxico na solução. Kidd et al. (2001) sugeriram que o aumento na exudação de compostos fenólicos que conduzem a desintoxicação do Al é responsável pelo Si aumentando a resistência da cultivar de milho.

Um dos melhores índices para avaliar a tolerância ao Al^{3+} em milho tem sido definido pelo crescimento da raiz seminal de plântulas desenvolvidas em solução nutritiva. O teste de solução nutritiva é conveniente, pois permite maior controle experimental e apresenta as seguintes vantagens: rapidez, menor custo operacional, maior facilidade de avaliação e satisfatória eficiência (FURLANI et al., 2000).

Embora muitos progressos tenham sido feitos nesses recentes anos, o mecanismo de indução do Al^{3+} à inibição do alongamento radicular não são ainda bem entendidos (WANG et al., 2004) e novos experimentos nessa linha de pesquisa devem ser avaliados gerando resultados capazes de esclarecer o efeito do Si na redução ao estresse do Al^{3+} na cultura do milho, tornando-se um estudo de grande relevância para a pesquisa nacional. Sendo assim, dois experimentos foram realizados com o objetivo de verificar o possível efeito de doses crescentes de Si contra ação deletéria do Al^{3+} na parte aérea e raiz de duas cultivares de milho, suscetível e tolerante ao alumínio, modificando o tempo de exposição das raízes dos cultivares em solução nutritiva com a presença do Si.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A cultura do milho

O milho é semeado em todo território brasileiro podendo ser cultivado durante todo o ano, quando irrigado, menos na região sul em épocas de geadas. Sua importância reside ainda em sua capacidade de empregar mão-de-obra e por ser, entre os grãos, o produto de maior volume produzido, respondendo pelo segundo maior valor da produção, superado apenas pela soja. O milho é também o principal insumo para a formulação de rações utilizadas na criação de animais (MIRANDA et al., 2005).

No passado, o milho era freqüentemente consorciado com o feijão e o seu cultivo sempre esteve relacionado à noção de subsistência. Atualmente a produção desse cereal é mais facilmente associada a cultivos comerciais, baseados na utilização de tecnologias modernas (MIRANDA et al., 2005).

Apesar do alto potencial produtivo da cultura do milho (FANCELLI e DOURADO NETO, 2004), o que se observa, na prática, é uma produtividade muito baixa e irregular, por motivo de baixa tecnologia. Além disso, o milho pode ser influenciado por problemas como pragas, doenças, déficit hídrico em períodos críticos do desenvolvimento das plantas, inadequadas condições químicas e físicas do solo, e deficiência de alguns nutrientes.

Neste sentido, a atenção deve ser voltada para: fertilidade do solo, disponibilidade potencial de nutrientes, época, forma e modo de aplicação de fertilizantes, absorção e acúmulo de nutrientes pelo milho e translocação e exportação de nutrientes (FREITAS, 2008).

Nos estágios iniciais de desenvolvimento do milho, o sistema radicular se constitui no dreno principal da planta e seu crescimento é decisivamente influenciado pelo suprimento de carboidratos sintetizados e acumulados na parte aérea, nessa etapa. A diminuição dessa disponibilidade, bem como a dificuldade de translocação de açúcares, contribuirá para a diminuição do volume de solo a ser explorado pela planta. Nesse particular, qualquer anormalidade que provoque a destruição de raízes pode reduzir irreversivelmente o potencial produtivo do milho (FANCELLI, 2007).

A planta encontra-se apta à realização do processo de fotossíntese aproximadamente uma semana após a emergência, quando apresenta duas folhas totalmente expandidas. No primeiro nó basal, já é identificado um grupo de raízes adventícias não ramificadas e sem pêlos absorventes, diferentemente das raízes seminais, que são ramificadas e com pêlos absorventes (FANCELLI e DOURADO NETO, 2004).

4.2 Alumínio no solo

O conhecimento da química do Al 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 P e Mo, acarretando em inibição do crescimento de raízes e absorção de água (BOHNEN, 2000).

Portanto, nesse tipo de solo, com pH ácido, o Al está presente em formas tóxicas, prejudicando a planta como um todo (KOCHIAN, 1995). Outra mudança que ocorre durante a constituição do solo a partir da rocha, é a formação de argilas e substâncias húmicas, com capacidade de atrair íons com carga positiva até sua superfície. No entanto, esta atração é proporcional, principalmente, à valência dos íons. O Al^{3+} com três valências é 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).

De acordo com o pH da solução do solo, há uma forma predominante de espécie química de Al fitotóxico, podendo ser o Al livre na forma trivalente, o polinuclear e o complexado com baixo peso molecular (CARVALHO, 2003). Em pH ácido, menor que 5,0 o Al trivalente existe como hexahidrato octaédrico, $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ que por convenção é chamado de Al^{3+} . Com o aumento do pH, a forma Al^{3+} sofre sucessivas perdas de prótons, ficando na forma $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$. Em pH neutro o Al está na forma de gibsit, $\text{Al}(\text{OH})_3$, que é relativamente insolúvel e não é absorvido pelas plantas. Ao atingir o valor em torno de 7,4, pH citoplasmático, o íon predominante é $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (KOCHIAN, 1995).

O pH adequado para a maioria das culturas se encontra entre 6,0 e 7,0 (VASCONCELOS et al., 2002), onde os teores de Al^{3+} na solução do solo encontram-se baixos ou até mesmo inexistentes. Sabe-se que as concentrações de Al^{3+} na solução do solo estão abaixo de 1 mg L^{-1} em pH superior a 5,5, e sua concentração eleva-se de modo marcante em pH baixo (MASCARENHAS et al, 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 LICUDINE, 1999).

4.3 Alumínio na planta

Em geral, considera-se como prejudicial às plantas o teor de Al trocável acima de $5\text{ mmol}\cdot\text{dm}^{-3}$, em solos brasileiros (MALAVOLTA, 1980). Essa toxicidade é, geralmente, o fator mais limitante ao aumento da produtividade das culturas (JUSTINO et al., 2006). Vilela e Anglinoni (1984), relataram que a presença de altas concentrações de Al tóxico no solo paralisa o crescimento radicular, provocando aumento no diâmetro radicular.

O efeito primário da toxidez de Al manifesta-se, geralmente, bloqueando o crescimento radicular, possivelmente, por afetar o alongamento e a divisão celular. É comumente aceito que o Al afeta a divisão celular por aumentar a estabilidade da dupla hélice, dificultando, portanto, a replicação do DNA na interfase e alongamento celular por reduzir a plasticidade e a elasticidade da parede celular (FERREIRA et al., 1986).

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. Desta forma, as plantas assumem maior suscetibilidade à seca, por serem impedidas de obter água das camadas mais profundas do solo, o que afeta significativamente a produção de grãos (CAMARGO et al., 1998). Além disso, o Al interfere na absorção e movimentação do P, Ca, Mg e Mo (OLMOS e CAMARGO, 1976). Sob o estresse desse elemento, as plantas paralisam seu crescimento radicular, reduzem a absorção de nutrientes, refletindo num declínio na produção (BRONDANI e PAIVA, 1996). Estudos recentes têm demonstrado que o sítio primário de indução da inibição do crescimento das plantas causada pelo alumínio está localizado no ápice radicular (RAPOSEIRAS et al., 2005).

COSTA (2000) em trabalho que visou avaliar os efeitos nocivos do Al na morfologia de raízes de plantas de milho, concluiu que o elemento não altera a morfologia, mas acarreta diminuição no poder de absorção de K pelas raízes. O principal efeito do Al está na inibição da divisão celular da raiz, implicando em redução no sistema radicular e, por conseguinte, redução na absorção de nutrientes.

Embora pouco se saiba sobre o mecanismo pelo qual o Al exerce seus efeitos tóxicos em plantas, o sintoma de toxicidade mais facilmente reconhecido é a inibição do crescimento da raiz, o qual tem se tornado importante indicador do estresse para esse elemento (DELHAIZE e RYAN, 1995). Além disso, o efeito danoso do Al^{3+} pode manifestar-se pela limitação do desenvolvimento radicular, bem como interferência na absorção, transporte e utilização de nutrientes, refletindo num declínio da produção (SILVA, 2002).

Horst et al. (1997), ressaltam que estes efeitos são devido à diminuição dos processos fisiológicos e bioquímicos. Segundo Jones et al. (1998), a toxicidade do Al está ligada a mudanças na homeostase celular do Ca e no bloqueio de canais na membrana plasmática, sendo que o Al altera, ainda, a permeabilidade da membrana plasmática. Seus efeitos são causados por mudanças na fluidez dos lipídios, resultantes da ligação eletrostáticas de espécies catiônicas de Al a regiões polares dos fosfatidilcolina (JUSTINO et al., 2006).

Sasaki et al. (1996) verificaram que o Al causa severas e irreversíveis mudanças na parede celular, induzindo a lignificação do ápice radicular de trigo, e assim causando inibição do alongamento celular. Embora as bases celulares e moleculares das

diferenças em tolerância à toxicidade do Al ainda não estejam esclarecidas (LARSEN et al., 1998; VASCONCELOS et al., 2002), sabe-se que a região do ápice radicular é o alvo primário da ação tóxica do Al.

Os efeitos primários da toxicidade causada pelo Al estão, aparentemente, relacionados à sua concentração intracelular, visto que os mecanismos de tolerância decorrem de limitações à entrada desse elemento no simplasto (LAZOF et al., 1994). Vale ressaltar que o Si depositado principalmente na parede celular, aumenta a rigidez das células epidérmicas, deixando-as mais grossas e com grau maior de lignificação e / ou silicificação, formando uma barreira mecânica (ADATIA e BESFORD, 1986), a qual poderia reduzir a velocidade de entrada do Al no simplasto.

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. 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).

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, verificaram decréscimo no alongamento celular com o aumento dos níveis de Al na solução nutritiva.

4.4 Silício na solução do solo

O Si está presente na solução do solo como ácido monossilícico (H_4SiO_4), em grande parte na forma não dissociada, que é facilmente absorvido pelas plantas (RAVEN, 1983). Por isso, apesar de ser um ácido, o Si possui comportamento de base, sendo representado por alguns autores como $Si(OH)_4$ ao invés de H_4SiO_4 (SAVANT et al., 1997).

O Si pode ser adsorvido às superfícies dos óxidos de Fe, possivelmente nos mesmos sítios do P; o fato de competirem pelos mesmos sítios de adsorção pode fazer com que o Si(OH)_4 , quando adicionado ao solo, favoreça a liberação do P para as plantas, ou diminua o excesso de absorção, no caso de uma elevada adubação fosfatada (OBIHARA e RUSSEL, 1972; KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2000). Deste modo, de maneira indireta, o Si pode favorecer o desenvolvimento de plantas via regulação da absorção de P (OBIHARA e RUSSEL, 1972; KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2000).

A quantidade de Si presente nos solos tropicais pode ser 5 a 10 vezes menor que nos solos de regiões temperadas (FOY, 1992). A concentração de Si na solução do solo pode variar bastante, sendo que o equilíbrio químico do elemento no solo depende principalmente do pH (EPSTEIN, 1994).

As fontes de Si comercialmente utilizadas são os metassilicatos de Na e de K (preferidos em cultivos hidropônicos e em aplicações foliares devido à alta solubilidade) e ácido silícico, com efeitos e utilização semelhantes (REIS, 2007).

A quantidade de Si a ser aplicada no solo precisa ser definida ou calibrada com mais critério. Entretanto, quanto mais Si for absorvido pelas plantas, maiores serão as chances de se obter resultados positivos e/ou benéficos na produtividade das culturas (KORNDÖRFER et al., 2004).

4.5 Silício na planta

O conteúdo de Si nas plantas varia de 0,1% a 10%, concentrando-se nos tecido-suporte do caule, folhas e grãos (REIS et al., 2007). As plantas podem ser classificadas como acumuladoras e não acumuladoras de Si, de acordo com suas habilidades. Nas plantas acumuladoras a absorção está ligada à respiração aeróbica, sendo representantes desse grupo as gramíneas.

No interior da planta, 99% do Si acumulado encontram-se na forma de ácido silícico polimerizado, o restante, 1%, encontra-se na forma coloidal ou iônica (KORNDÖRFER et al., 2002). Ao ser absorvido pelas plantas, o Si é facilmente translocado no xilema, e tem tendência natural a se polimerizar, associando-se a compostos orgânicos como proteínas, polissacarídeos e lignina (EPSTEIN, 1994; KOLESNIKOV e GINS, 2001).

O Si também é encontrado nas plantas na forma de sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), também chamada de fitolito. Nesta forma o Si torna-se imóvel e não pode ser redistribuído dentro da planta. A sílica hidratada pode estar depositada no lúmen e na parede celular, nos espaços intercelulares ou nas camadas externas, em raízes, folhas, e brácteas das inflorescências de cereais (EPSTEIN, 1994).

Yassuda (1989) relata que nas gramíneas o Si é absorvido de forma passiva, por fluxo de massa, em processos não seletivos. Porém, Ma e Takahashi (2002) mencionam que o arroz tem mecanismos específicos para a absorção de Si da solução do solo. Essa absorção ocorreria de forma ativa por proteínas de membrana sintetizadas a partir de um gen específico para esse fim, mostrando um rápido acúmulo de Si na fase de crescimento do arroz (MITANI et al., 2005).

O Si pode formar complexos com os compostos fenólicos e elevar a síntese e mobilidade destes no apoplasto. Uma rápida deposição de compostos fenólicos ou lignina nos sítios de infecção é um mecanismo de defesa (MENZIES et al., 1991).

Nas folhas das gramíneas, forma-se uma camada de sílica abaixo da cutícula, nas células epidérmicas, contribuindo para fortalecer a estrutura da planta, aumentar a resistência ao acamamento, reduzindo a perda de água, em função desta dupla camada de sílica abaixo da cutícula, nas células epidérmicas, além de menor transpiração que reflete em maior economia de água, as gramíneas mantêm suas folhas mais eretas promovendo maior aproveitamento da luz e esta refletindo num maior aproveitamento fotossintético (TAKAHASHI, 1995).

Savant et al. (1997) afirmam que após o Si ser absorvido pelas plantas como ácido monossilícico e a água ser perdida pela evapotranspiração, o Si fica depositado no tecido da epiderme das folhas. Assim, há evidências de que a redução da transpiração cuticular pode chegar a 30% nas plantas tratadas com Si (YOSHIDA et al., 1959). Agarie et al. (1998) encontraram menor taxa de transpiração em plantas que cresceram em meio onde havia Si.

De acordo com Wallace (1992), quando a absorção de cátions pelas raízes das plantas excede a absorção de ânions, a solubilidade de Si é reduzida pelo aumento de acidificação do solo. Quando a absorção de ânions excede a absorção de cátions, a solubilidade de Si aumenta devido à elevação do pH do solo.

4.6 Alumínio e o silício

As acumulações de Al e Si na parte aérea das plantas são mutuamente exclusivas, isto é, quando o Si é absorvido o Al deixa de ser (FREITAS, 2011). 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).

Existem estudos com a adição de Si em solução nutritiva demonstrando a capacidade do Si estimular a produção de compostos orgânicos exsudados pelas raízes, 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).

MENGEL e KIRBY (1987) citam que óxidos de Al são mais efetivos que óxidos de Fe na adsorção de Si. Com base neste fato, o papel do Si está na formação de complexos estáveis com o Al, reduzindo os efeitos nocivos deste elemento através da deposição de aluminossilicatos, no solo, ou no interior de organismos (DUAN e GREGORY, 1998; PERRY e KEELING-TUCKER, 1998; NEUMANN e NIEDEN, 2001; BRITZ et al., 2002).

INANAGA e OKASAKA (1995) e INANAGA et al. (1995) relataram o papel do Si e do Ca na formação de ligações entre carboidratos e lignina, a partir da sua associação com ácidos fenólicos e anéis aromáticos, nas paredes celulares de plantas de arroz, o que confere maior resistência aos tecidos vegetais. Ainda neste sentido, cabe citar outro importante papel do Si na substituição de fenólicos em funções como proteção contra raios UV e defesa contra herbivoria, a partir de depósitos na parede celular formados a um menor custo energético para a planta (GOTO et al., 2003).

Segundo Wang et al. (2004) o Al se liga rapidamente na parede celular alterando suas propriedades e assim afetando o crescimento da raiz. O efeito melhorado do Si na toxidez do Al nas plantas foi atribuído pela redução na disponibilidade do Al tóxico em algumas culturas estudadas por autores (BAYLIS et al.; 1994). Esta diminuição na concentração do Al é devido à suposta formação biológica dos complexos inativos de hydroxylaluminumsilicates (HAS). Cocker et al. (1998) propuseram a formação do (HAS) no apoplasto, de forma que o Al poderia ser transferido em uma forma não tóxica, sem reduzir o conteúdo de Al.

Talvez a função bioquímica mais importante do Si, principalmente, em plantas acumuladoras desse elemento benéfico, esteja relacionada à síntese de lignina. De acordo com Mengel e Kirkby (1987), o ácido silícico reage com fenóis, precursores da lignina na planta, o que resulta em complexos de silício de alta estabilidade e baixa solubilidade, denominados compostos polifenólicos, os quais apresentam função estrutural e são depositados nas paredes de células lignificada (MARSCHNER, 1995).

A tolerância da planta ao Al está relacionada a genes que codificam enzimas que combatem o estresse oxidativo ou infestação por patógenos e proteínas responsáveis pela transdução de sinais (DRUMMOND et al., 2001), características estas predominantes da presença de Si na planta. Referente a transdução de sinais, Epstein (1999) sugere que o Si possa agir como um segundo mensageiro dentro das células, afirmando, também, que os mecanismos de defesa mobilizados pelo Si incluem acumulação de lignina, compostos fenólicos, quitinas e peroxidases.

A ação do silício possibilitando maior produção de lignina pode reduzir ações do Al na planta, o qual pode causar desorganização estrutural e das funções das membranas, paralisação da síntese de DNA e das mitoses, enrijecimento das paredes celulares, redução no alongamento celular e distúrbios na assimilação e no metabolismo mineral nos ápices das raízes (PAVAN et al., 1982; DELHAIZE e RYAN, 1995).

4.7. Compostos fenólicos

Por uma questão de conveniência, os compostos químicos das plantas são freqüentemente classificados como metabólitos primários ou secundários (SALISBURY e ROSS, 1992). Os carboidratos são considerados os produtos finais da fotossíntese e a fonte de carbono e energia para a síntese de gorduras, ácidos graxos, aminoácidos e ácidos orgânicos (BALANDRIN et al., 1985). Podem ocorrer na forma livre, como ésteres (SOSULSKI et al., 1982), ou como formas insolúveis, ligados aos carboidratos da parede celular. A acumulação de fenólicos durante a formação da parede celular leva a uma diminuição da extensibilidade e ao aumento da rigidez mecânica (TAN et al., 1992), podendo estar relacionado com a inibição do crescimento das plantas.

Os metabólitos secundários, ou compostos secundários, são biossinteticamente derivados do metabolismo primário, e podem ser reconvertidos para açúcar

e outros compostos utilizados na estrutura e manutenção das plantas (WARING e SCHLESINGER, 1985). Ao contrário dos metabólitos primários são sintetizados preferencialmente em células especializadas e em distintos estádios de desenvolvimento da planta, o que muitas vezes dificulta seu doseamento, extração e purificação (BALANDRIN et al., 1985).

Quando os compostos secundários presentes nas plantas exercem algum efeito fisiológico de propriedade terapêutica, é prática comum individualizar os responsáveis por tal efeito, denominando-os de princípios ativos. Os fenóis vegetais são compostos secundários, não nitrogenados, baseados em cadeias de carbono, cujo elemento estrutural fundamental caracteriza-se por um anel benzênico ao qual está ligada pelo menos uma hidroxila (BRUNETON, 1991). Constituem um grupo quimicamente heterogêneo, com aproximadamente 10.000 compostos, alguns solúveis apenas em solventes orgânicos, outros solúveis em água, e há ainda aqueles que são grandes polímeros insolúveis (TAIZ e ZEIGER, 2004).

A presença de compostos fenólicos, na raiz da planta de sorgo foram consideradas as melhores indicadoras à tolerância ao Al, a fim de distinguir cultivares quanto à sensibilidade a esse elemento tóxico, quando comparados a outros parâmetros como coloração radicular como hematoxilina férrica, morfologia interna e externa dos ápices radiculares. A exposição das plantas de sorgo ao Al resultou em aumento nos teores de fenóis, nos ápices radiculares, tanto na cultivar sensível (32%) quanto na tolerante (42%) (PEIXOTO et al., 2007).

Segundo Sasaki et al. (1996), a deposição de lignina em plantas tratadas com Al ocorre nas células correspondentes à zona de alongamento e, sugerem que esse processo pode contribuir indiretamente para a redução dos danos às membranas celulares. Assim como a lignina, os compostos fenólicos solúveis totais também atuam na toxidez do Al na planta.

Após tratamentos prolongados com Al, as raízes das plantas tornam-se escuras, o que, em parte, é decorrente da oxidação de compostos fenólicos (CAKMAK e HORST, 1991). O Al induz a expressão de um gene que codifica uma proteína, com alta

homologia de seqüência, para a enzima fenilalanina amônia-liase (PAL) considerada precursora da síntese de substâncias fenólicas (SNOWDEN e GARDNER, 1993).

Kidd et al. (2001) trabalhando com um genótipo de milho tolerante ao alumínio, observaram que a exsudação de catechol e flavonóides (catechina e quercetina) aumentou com a concentração externa de alumínio, demonstrando que esses compostos podem estar envolvidos no processo de tolerância ao alumínio. Os ácidos fenólicos têm sido encontrados como componentes da parede celular de várias monocotiledôneas (HARRIS e HARLEY, 1976; SHIBUYA, 1984) e também em algumas dicotiledôneas (FRY, 1989). A biossíntese de compostos fenólicos também parece ser regulada pela maior ou menor disponibilidade de Si. A alta afinidade do ácido silícico por *o*-difenois, como o ácido cafeico e ésteres correspondentes, resulta em complexos de silício de alta estabilidade e baixa solubilidade, os quais teriam uma função estrutural na forma de depósitos nas paredes de células lignificadas. Isto seria uma vantagem para a planta, já que a biossíntese dos complexos de silício demanda muito menos energia do que a síntese de compostos fenólicos, como por exemplo a lignina (RAVEN, 1983).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização dos experimentos e clima

Dois experimentos foram conduzidos em Casa de Vegetação do Departamento de Recursos Naturais – Área Ciência do Solo, Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Campus de Botucatu (SP), localizada a 22°51' latitude S e 48°26' longitude W, com altitude de 786m, temperatura média anual de 20,5°C e umidade relativa do ar de 71% (MARTINS, 2003).

5.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado nos dois experimentos foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 4x2, com três repetições. Os tratamentos foram constituídos de dois cultivares de milho (suscetível e tolerante ao alumínio) e quatro doses de silício (0, 1, 2 e 4 mmol L⁻¹).

5.3 Características das cultivares

A cultivar AG8060 é proveniente da Empresa Agrocere. Apresenta porte médio, ciclo precoce, inserção da espiga média, grão duro alaranjado, bom

empalhamento e qualidade do colmo, sistema radicular desenvolvido e finalidade do uso como produção de grãos. A recomendação é de 55 a 60 mil plantas por hectare. É considerado tolerante ao Al^{3+} .

A cultivar Exceler é proveniente da Empresa Syngenta e é direcionada para os plantios de verão na região central e na safrinha em todo Brasil, posicionado com destaque no segmento de média tecnologia. Tem também como características a qualidade de colmo, performance e estabilidade, em especial na safrinha do PR e SP, seu ciclo até o florescimento pode variar de 65 a 75 dias e até a colheita de 135 dias a 165 dias. População de 55.000 a 60.000 plantas por hectare e peso de 1000 grãos de 312 gramas. É considerado sensível ao Al^{3+} (FURLANI et al., 2000).

5.4 Instalação e condução dos experimentos

As sementes das duas cultivares de milho (AG8060 e EXCELER), já tratadas com fungicida, inseticida e nematicida, foram colocadas para germinar em papel de filtro distribuídas 1 cm entre si, contendo em torno de 32 sementes por papel filtro. O papel foi enrolado e umedecido. Estes rolos foram acomodados em germinador à temperatura média de 25°C. Após 5 dias de germinação os rolos foram retirados do germinador e as plântulas foram selecionadas quanto à uniformidade para serem posteriormente colocadas em solução nutritiva.

A solução nutritiva utilizada nos dois experimentos foi baseada na solução descrita por Magnavaca (1982), modificada de acordo com cada tratamento (T0 – 0; T1- 1; T2 - 2 e T4 - 4 $mmol L^{-1}$) (Tabela 1). A fonte de silício utilizada foi o silicato de potássio líquido, contendo 477,86 $mg L^{-1}$ de silício e 131,82 $mg L^{-1}$ de potássio. A fonte de alumínio utilizada foi o $AlK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ recomendada por Furlani e Furlani (1988).

Foram utilizados, em cada experimento, vasos de plástico, na cor marrom, medindo 33,5 cm de comprimento, 13,5 cm de largura e 12,0 cm de profundidade. Cada vaso recebeu uma tampa de compensado de 4 mm, com 4 furos para fixar as plântulas (2 plântulas para cada furo) com o auxílio de pedaços de espuma, de forma que, apenas as raízes ficassem em contato com a solução, e um furo menor na borda para o encaixe da mangueira de aeração.

Tabela 1. Composição da solução estoque e solução nutritiva utilizada para estudo de resposta de cultivares de milho a tolerância do alumínio sob doses de silício em solução nutritiva.

Frascos	Tratamento	Fontes	g L ⁻¹	Elemento	mg L ⁻¹
1		Ca(NO ₃).4H ₂ O	270,00	Ca	141,10
		NH ₄ NO ₃	48,45	Mg	20,80
2	T0	KCl K ₂ SO ₄	39,12 44,00	NO ₃ -N	159,90
				NH ₄ -N	26,10
				P	1,40
3	T1	KCl K ₂ SO ₄	26,79 44,00	S	19,1
				B	0,27
				Fe	4,20
4	T2	KCl K ₂ SO ₄	17,86 44,00	Mn	0,50
				Cu	0,04
				Mo	0,08
5	T4	KCl K ₂ SO ₄	0 44,00	Zn	0,32
				Na	0,04
				K	90,40
6		Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	142,4	Cl	43,00
				Al	5,94
				Si - T0	0
7		KH ₂ PO ₄	17,6	Si - T1	1
				Si - T2	2
				Si - T4	4
8		Quelato de Fe	100		
9		MnSO ₄ .H ₂ O	2,03		
		H ₃ BO ₃	2,04		
		ZnSO ₄ .7H ₂ O	1,40		
		CuSO ₄ .5H ₂ O	0,20		
		Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0,26		
10		AlK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	52,77		
11	T0	Silicato de potássio	0,48		
	T1				
	T2				
	T4				

Em cada vaso foram colocados 4,5 litros de solução nutritiva e acomodados em uma bancada dentro da casa de vegetação com temperatura de 24° a 27°C e umidade controlada. Os experimentos receberam quatro horas de aeração, divididas em quatro períodos de uma hora, diariamente com o auxílio de um compressor. O pH foi diariamente monitorado e quando necessário ajustado com NaOH a 0,1 mol L⁻¹ para aumentar ou HCl a 0,1 mol L⁻¹ para abaixar. A solução nutritiva de cada vaso foi trocada a cada sete dias evitando

dessa forma a redução da condutividade elétrica. Os vasos receberam diariamente água desmineralizada para reposição por perdas ocorridas por evapotranspiração.

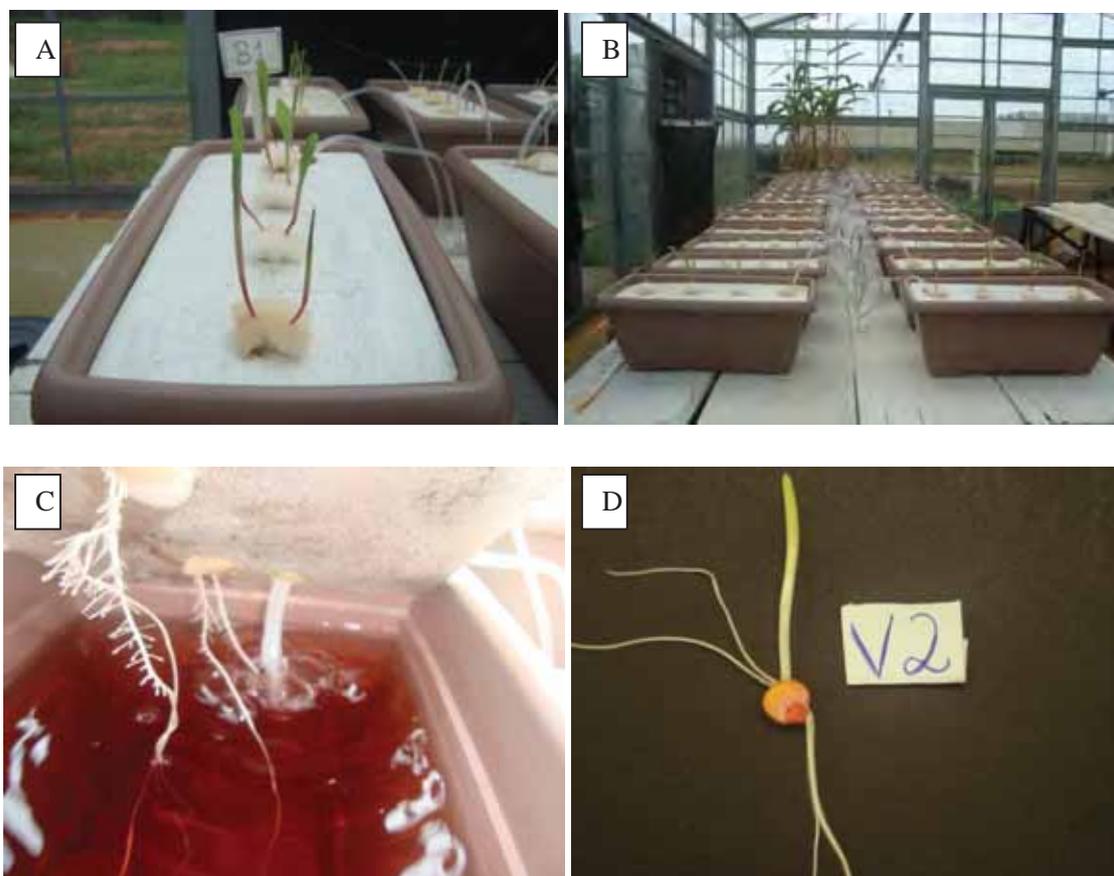


Figura 1. Fotos dos experimentos. (A) Duas plântulas por furo; (B) Bancada do experimento; (C) Solução nutritiva com aeração; (D) plântula com 5 dias de germinação.

Os dois experimentos receberam a mesma solução nutritiva, modificando apenas o período de permanência das plantas em solução com a presença do Si e sem a presença do Al seguindo, no entanto, os tratamentos pré-estabelecidos (Tabela 1). Na primeira semana dos dois experimentos as plântulas foram colocadas em solução nutritiva com apenas metade de sua concentração (à meia força iônica) com Si e sem Al e, após esses 7 dias, a concentração total foi colocada. Faltando 10 dias para finalizar os experimentos, o Si foi retirado da solução e o Al colocado, em uma concentração, pré-estabelecida, procurando gerar toxidez (PATERNIANI e FURLANI, 2002). As plantas de milho no primeiro experimento ficaram 18 dias em solução nutritiva contendo Si (sem o Al) e mais 10 dias contendo Al (sem

Si) totalizando 28 dias e, no segundo experimento ficaram 9 dias em solução contendo Si (sem o Al) e mais 10 dias contendo Al (sem Si) no total de 19 dias até sua colheita.

5.5 Parâmetros avaliados nos dois experimentos

5.5.1 Variação do comprimento da raiz e parte aérea (colmo + folha)

O comprimento radicular e o comprimento da parte aérea das duas cultivares de milho foram medidos em três momentos nos experimentos. A primeira medição foi feita no momento em que as plântulas (5 dias de germinação) entraram em contato com a solução nutritiva; a segunda medição foi feita, no primeiro experimento, aos 18 dias em contato com a solução e, no segundo experimento, aos 9 dias em contato com a solução contendo Si (sem o Al); a terceira medição foi feita no final dos dois experimentos, ou seja, 10 dias após o contato com o Al, obtendo a variação (Δ) do comprimento no período inicial (comprimento da raiz e parte aérea antes de colocar alumínio em solução menos comprimento inicial da raiz e parte aérea) e a variação do comprimento no período final (comprimento da raiz e parte aérea no momento da colheita menos o comprimento da raiz e parte aérea antes de colocar alumínio em solução). Para a obtenção do comprimento radicular e parte aérea as plantas foram retiradas dos vasos e com o auxílio de uma régua graduada e as medidas foram apuradas.

5.5.2 Massa fresca e seca da raiz e parte aérea (colmo + folha)

No momento da colheita, aos 28 dias no primeiro experimento e 19 dias no segundo experimento, em contato com a solução nutritiva, a raiz e a parte aérea das oito plantas de cada vaso foram separadas e pesadas, obtendo assim, a massa fresca. Após a lavagem foram colocadas em estufa com circulação forçada de ar, a 65°C por 4 dias, após esse processo foram pesadas, obtendo a massa seca.

5.5.3 Teores de nutrientes, Si e fenóis solúveis totais na raiz e parte aérea (colmo + folha)

Amostras das raízes e parte aérea das plantas de milho foram coletadas e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar, a 65°C, moídas e posteriormente analisadas, no Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, do Departamento de Recursos Naturais/ Ciência do Solo/ Botucatu/SP, determinando os seus teores de N, P, K,

Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn (MALAVOLTA, VITTI e OLIVEIRA, 1997); de Si (KORNDÖRFER, 2004) e de fenóis solúveis totais (DAWRA et al., 1988).

5.5.4 Quantidade acumulada de nutrientes, Si e fenóis solúveis totais na raiz e parte aérea (colmo + folha)

Através dos dados de produção da massa seca e dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Si e Fenóis solúveis totais, da raiz e da parte aérea, foi determinada a quantidade acumulada de nutrientes no sistema radicular e na parte aérea, respectivamente por vaso (8 plantas/vaso). O cálculo foi obtido multiplicando-se os valores dos teores pelos valores de matéria seca, e dividindo o resultado da multiplicação por 1000.

5.6 Análise estatística

Os dados obtidos, nos dois experimentos, de todos os parâmetros avaliados foram submetidos à análise de variância. Os efeitos das doses de Si foram analisados por meio de análise de regressão a 5% de probabilidade e as médias referentes as cultivares foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%, com o auxílio do programa estatístico SISVAR.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Comprimento das raízes

A variação no comprimento das raízes no período inicial (com Si e sem Al) apresentou diferença significativa entre as duas cultivares nos dois experimentos realizados. A cultivar Exceler (sensível) apresentou maior comprimento da raiz quando comparada com a cultivar AG8060 (tolerante) (Tabela 2), nos dois experimentos, sendo que a cultivar Exceler sem a presença do alumínio em solução possui desenvolvimento radicular mais eficiente quando comparado com a cultivar AG8060. Assim os efeitos primários da toxicidade causada pelo Al^{+3} estão aparentemente relacionados à sua concentração intracelular, visto que, os mecanismos de tolerância decorrem de limitações a partir da entrada desse elemento no simplasto (LAZOF et al., 1994). A variação no tempo de exposição em solução contendo silício nos dois experimentos não interferiu no comportamento das cultivares.

No comprimento das raízes no período final (sem Si e com Al) não foi verificado diferença significativa entre as duas cultivares nos dois experimentos (Tabela 2). No entanto, observa-se uma diminuição no comprimento da raiz nas duas cultivares após a aplicação do Al. Giongo e Bohnem (2011) avaliando as interações que ocorrem entre

alumínio, cálcio e silício no crescimento de dois genótipos de milho, tolerante e sensível à toxidez do alumínio, verificaram que o genótipo tolerante ao alumínio teve menor redução do comprimento das raízes no tratamento com alumínio quando comparado com o genótipo sensível. Furlani e Ranna (1984) verificaram no genótipo de milho HS777 (sensível ao alumínio) efeitos negativos no comprimento das raízes secundárias com o excesso de Al em solução. Os danos nas regiões meristemáticas das raízes primárias e laterais, causados pelo Al em excesso, ocorrem a ponto de se tornar difícil à distinção de coifa e elementos vasculares (PIÑEROS et al., 2002).

Tabela 2. Comprimento durante o período inicial da raiz (com Si e sem Al) e final (com Al e sem Si) da raiz, no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.

Cultivares	Comprimento no período inicial (raiz)		Comprimento no período final (raiz)	
	Experimento I	Experimento II	Experimento I	Experimento II
	----- cm -----		----- cm -----	
Exceler*	34,18 a	24,93 a	6,92 a	12,66 a
AG 8060*	29,80 b	9,30 b	8,20 a	13,08 a
CV%	8,39	10,19	32,91	10,19

Médias seguidas de letras diferentes, na coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Exceler (sensível Al^{3+}) e *AG8060 (tolerante Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

Os tratamentos com Si influenciaram significativamente o comprimento da raiz no período inicial nas duas cultivares, no primeiro experimento (Figura 2(A)), aumentando o comprimento com o aumento da dose de Si até atingir seu ponto máximo na dose de $1,43 \text{ mmol L}^{-1}$ para a cultivar Exceler, e na dose de $2,4 \text{ mmol L}^{-1}$ para a cultivar AG8060. Os tratamentos também influenciaram o comprimento da raiz no período inicial na cultivar AG8060, no segundo experimento (Figura 2 (B)), não influenciando a cultivar Exceler. Neste experimento houve uma queda no comprimento da raiz com o aumento da dose de Si aplicada, e o menor comprimento foi observado quando a maior dose foi aplicada. A diferença observada quanto aos valores encontrados para o comprimento das raízes nos dois experimentos (Figura 2 (A) e (B)), pode ter ocorrido devido ao tempo de exposição que as

raízes ficaram em solução contendo Si, já que no primeiro experimento, as cultivares ficaram quase dez dias a mais em solução contendo Si e sem o Al, gerando comportamento diferente nas cultivares.

O sintoma mais visível de toxidez de Al às plantas é a redução do crescimento do sistema radicular, causada por mecanismos diferentes, que atuam fora ou no interior das células (DELHAIZE e RYAN, 1995). O aumento na dose de Si não influenciou o comprimento da raiz no período final do primeiro experimento (Figura 2 (C)), não concordando com a hipótese levantada. 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+} . Mas, influenciou significativamente no segundo experimento (Figura 1(D)).

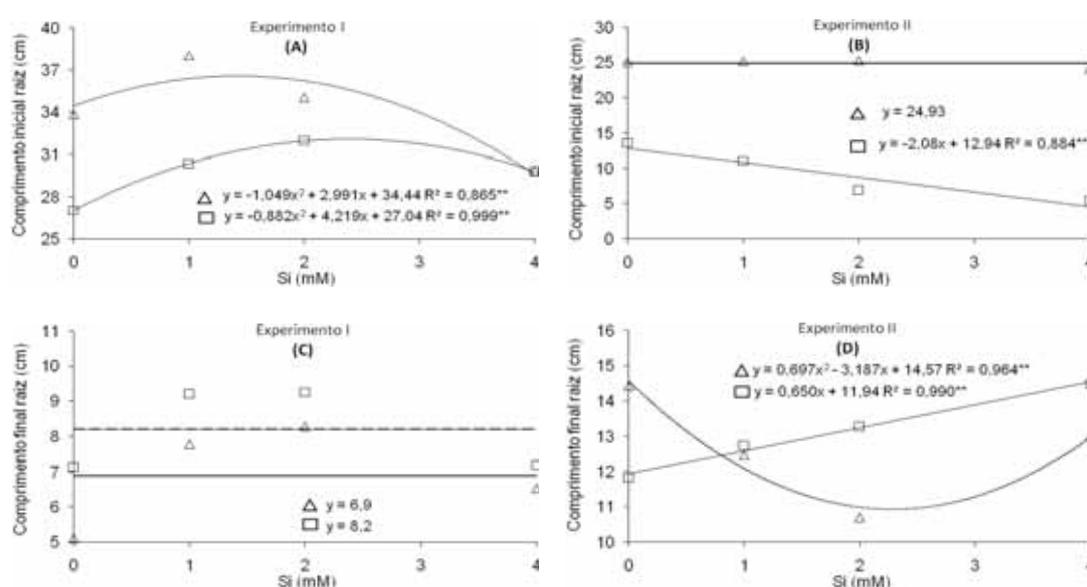


Figura 2. Comprimento da raiz no período inicial ((A) e (B)) e final ((C) e (D)), nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

Peixoto et al. (2007) estudando duas cultivares de sorgo (sensível e tolerante ao Al) os efeitos do Al sobre o acúmulo de compostos fenólicos, após a exposição

ao Al^{+3} , durante dez dias, observaram um decréscimo no crescimento do sistema radicular, além de redução na formação de raízes laterais, o que ocorreu em maior intensidade no sistema radicular da cultivar sensível. A cultivar Exceler no período inicial reduziu o comprimento da raiz, alcançando seu mínimo, com a presença do Al em solução, e a raiz da cultivar AG8060 cresceu linearmente com o aumento da dose de Si aplicada na presença do Al. Giongo e Bohnem (2011) com o objetivo de avaliar as interações que ocorrem entre Al, Ca e Si no crescimento de dois genótipos de milho verificaram um aumento no comprimento de raízes em 32% e 13% para o genótipo sensível e tolerante ao Al, respectivamente, no tratamento que o Si e o Al foram colocados juntos, respectivamente, em relação ao tratamento contendo apenas Al. Segundo Sangster et al. (2001) o silício influencia também o crescimento das plantas sob condições de toxidez de Al devido à formação de complexos na solução do solo e/ou por reduzir a toxidez interna de Al. Na parede celular do córtex de raízes pode ocorrer a formação de compostos aluminossilicatos, inibindo a absorção de alumínio para o protoplasma (GIONGO e BOHNEM, 2011).

6.2 Comprimento da parte aérea

O comprimento da parte aérea no período inicial apresentou diferença significativa entre as duas cultivares nos dois experimentos realizados. A cultivar Exceler gerou maior comprimento da parte aérea quando comparado com a cultivar AG8060 (Tabela 3) nos dois experimentos. Esses resultados indicam que a cultivar Exceler, sem a presença do Al em solução possui um desenvolvimento radicular maior do que a cultivar AG8060. O uso de Si tem promovido melhora na arquitetura da planta e aumento na fotossíntese (DEREN et al., 1994). A variação no tempo de exposição, das cultivares, em solução contendo silício nos dois experimentos não influenciou no comportamento das cultivares.

A toxidez de Al tem sido identificada como um dos mais importantes fatores limitantes do crescimento e desenvolvimento das plantas (GIONGO e BOHNEM, 2011). Quando o Al foi adicionado em solução o comprimento da parte aérea das cultivares no período final também apresentou diferença significativa, mas nesse caso, o resultado foi diferente. A cultivar AG8060 gerou valor maior comprimento nos dois experimentos quando comparado com a cultivar sensível (Tabela 3), confirmando ser a cultivar AG8060 mais

resistente na presença do Al. A variação no tempo de exposição das cultivares em solução contendo silício nos dois experimentos não influenciou no comportamento das cultivares.

As doses de Si não influenciaram significativamente o comprimento da parte aérea no período inicial das duas cultivares no primeiro experimento (Figura 3 (A)).

Tabela 3. Comprimento da parte aérea no período inicial (com Si e sem Al) e final (com Al e sem Si), no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.

Cultivares	Comprimento no período inicial (parte aérea)		Comprimento no período final (parte aérea)	
	Experimento I	Experimento II	Experimento I	Experimento II
	----- cm -----		----- cm -----	
Exceler*	38,60 a	19,27 a	11,61b	16,52 b
AG 8060*	36,47 b	13,46 b	13,37 a	19,24 a
CV%	4,50	4,39	11,53	7,89

Médias seguidas de letras diferentes, na coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Exceler (sensível Al^{3+}) e *AG8060(tolerante Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

No segundo experimento, as doses de Si influenciaram significativamente o comprimento da parte aérea no período inicial apenas para a cultivar AG8060, diminuindo o comprimento com o aumento da dose de Si aplicada. Talvez, esse comportamento da cultivar AG8060, no segundo experimento (Figura 3 (B)), seja devido ao menor tempo de exposição em solução contendo Si.

Os tratamentos com Si não influenciaram significativamente, o comprimento na parte aérea no período final, nas duas cultivares, nos dois experimentos (Figura 3 (C) e (D)), não concordando com nossa hipótese levantada. A hipótese era que a planta suprida com Si amenizaria o efeito tóxico do Al^{3+} , com isso o crescimento da parte aérea não seria inibido.

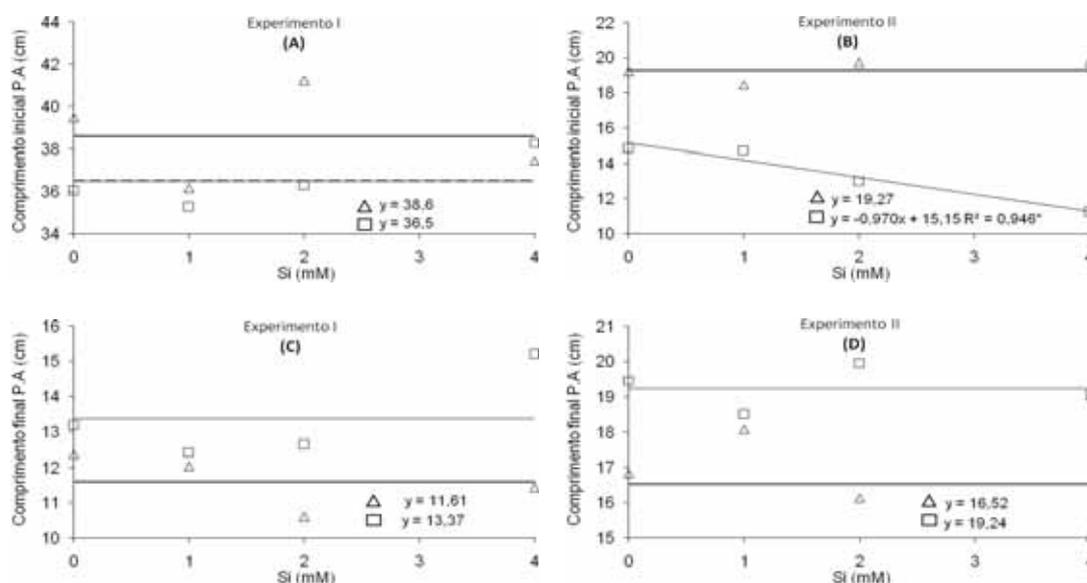


Figura 3. Comprimento da parte aérea no período inicial ((A) e (B)) e final ((C) e (D)), nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

6.3 Massa fresca e seca da raiz

As cultivares apresentaram diferença na massa fresca e seca da raiz no primeiro experimento, mas não apresentaram diferença significativa no segundo experimento (Tabela 4). A cultivar AG8060, no primeiro experimento, adquiriu maior massa fresca e seca quando comparado com a cultivar Exceler. Essa diferença significativa, no primeiro experimento, pode ter ocorrido devido ao maior tempo de exposição na solução com Si, quando comparado com o segundo experimento, proporcionando maior tempo para as cultivares mostrarem seu potencial. Segundo Korndörfer (2006) dentro da mesma espécie existe uma variabilidade genética podendo ocorrer diferentes respostas à toxidez de Al, explicando as diferenças encontradas entre os genótipos sensível e tolerante.

A massa fresca e seca da raiz das duas cultivares no primeiro experimento não apresentaram diferença significativa com as doses de Si aplicadas (Figura 4 (A) e (C)), mas apresentaram diferença no segundo experimento (Figura 4 (B) e (D)). A cultivar Exceler no segundo experimento apresentou aumento na massa fresca e seca da raiz

nas primeiras doses de Si aplicadas, alcançando a maior massa, na dose de 2,55 mmol L⁻¹ e 2,58 mmol L⁻¹, respectivamente.

A cultivar resistente ao Al reduziu linearmente sua massa fresca e seca com o aumento da dose de Si, não concordando com a hipótese levantada, sendo que, o esperado era um aumento na massa com o aumento da dose de Si. Talvez não tenha dado tempo da cultivar AG8060, no segundo experimento, se beneficiar com o Si, devido ao menor tempo de exposição em solução com Si, quando comparado com o primeiro experimento.

Tabela 4. Massa fresca e seca da raiz, no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.

Cultivares	Massa fresca (raiz)		Massa seca (raiz)	
	Experimento I	Experimento II	Experimento I	Experimento II
	----- g vaso ⁻¹ -----		----- g vaso ⁻¹ -----	
Exceler*	60,65 b	25,01 a	6,25 b	3,25 a
AG 8060*	82,13 a	26,20 a	7,29 a	3,25 a
CV%	12,30	9,83	7,22	5,59

Médias seguidas de letras diferentes, na coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Exceler (sensível Al³⁺) e *AG8060(tolerante Al³⁺). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

O esperado era um aumento na massa fresca e seca das raízes, com o aumento da dose de silício aplicada. O maior desenvolvimento foi obtido das raízes por Lima Filho e Tsai (2007), avaliando o efeito de doses crescentes de silício na produção de matéria seca das raízes de três cultivares de trigo em condições hidropônicas, e também encontrado pelos autores Gunes *et al.* (2008) que verificaram aumento de produção de matéria seca da raiz com o fornecimento de silício em seis cultivares de girassol.

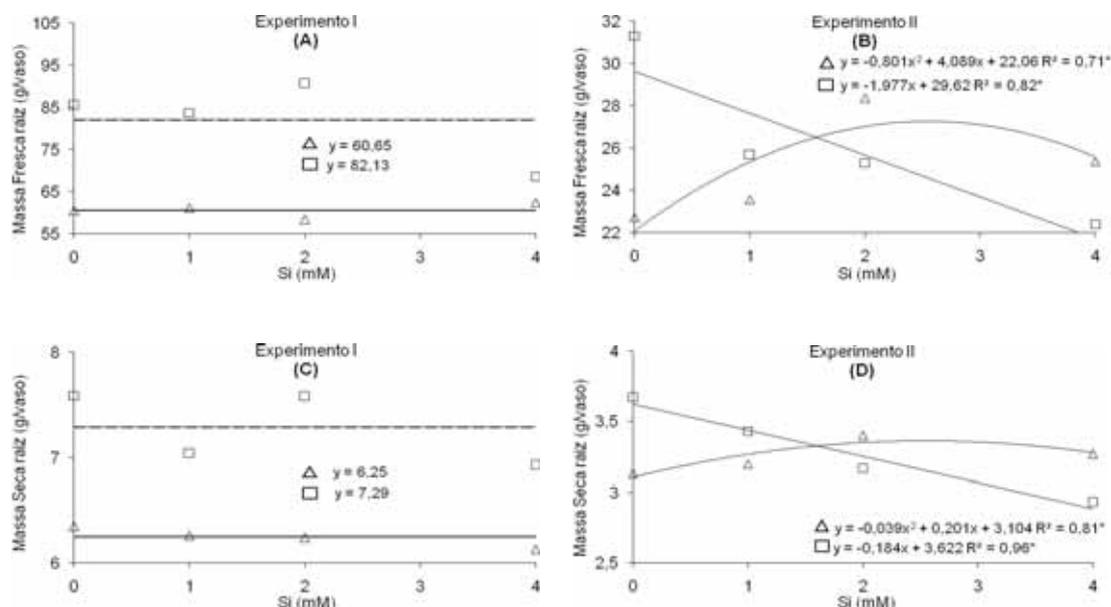


Figura 4. Massa fresca ((A) e (B)) e seca ((C) e (D)) da raiz, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Excels (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

6.4 Massa fresca e seca da parte aérea

A massa fresca e seca da parte aérea nos dois experimentos apresentaram diferença significativa entre as cultivares. A cultivar Excels nos dois experimentos apresentou maior massa fresca e seca quando comparado com a cultivar AG8060 (Tabela 5). Observou-se melhor o desenvolvimento da cultivar Excels na parte aérea mesmo sendo sensível ao alumínio quando comparada com a cultivar AG8060. Indiferente do tempo de exposição das plantas na solução contendo Si, nos dois experimentos, sendo que, as cultivares tiveram as mesmas respostas.

As doses crescentes de silício não influenciaram significativamente a massa fresca e seca da parte aérea das plantas no primeiro experimento (Figura 5 (A) e (C)), mas influenciaram significativamente no segundo experimento (Figura 5 (B) e (D)). Segundo Deren et al. (1993), o silício pode atuar favorecendo a fotossíntese, interferindo na arquitetura das plantas e até mesmo no metabolismo, o que implicaria em maior área foliar, como observado na cultivar Excels.

Tabela 5. Massa fresca e seca da parte aérea, no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.

Cultivares	Massa fresca (parte aérea)		Massa seca (parte aérea)	
	Experimento I	Experimento II	Experimento I	Experimento II
	----- g vaso ⁻¹ -----		----- g vaso ⁻¹ -----	
Exceler	116,73 a	48,52 a	12,90 a	5,25 a
AG 8060	109,51 b	41,07 b	12,00 b	3,97 b
CV%	5,33	5,29	3,51	6,40

Médias seguidas de letras diferentes, na coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Exceler (sensível Al³⁺) e AG8060 (tolerante Al³⁺). Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

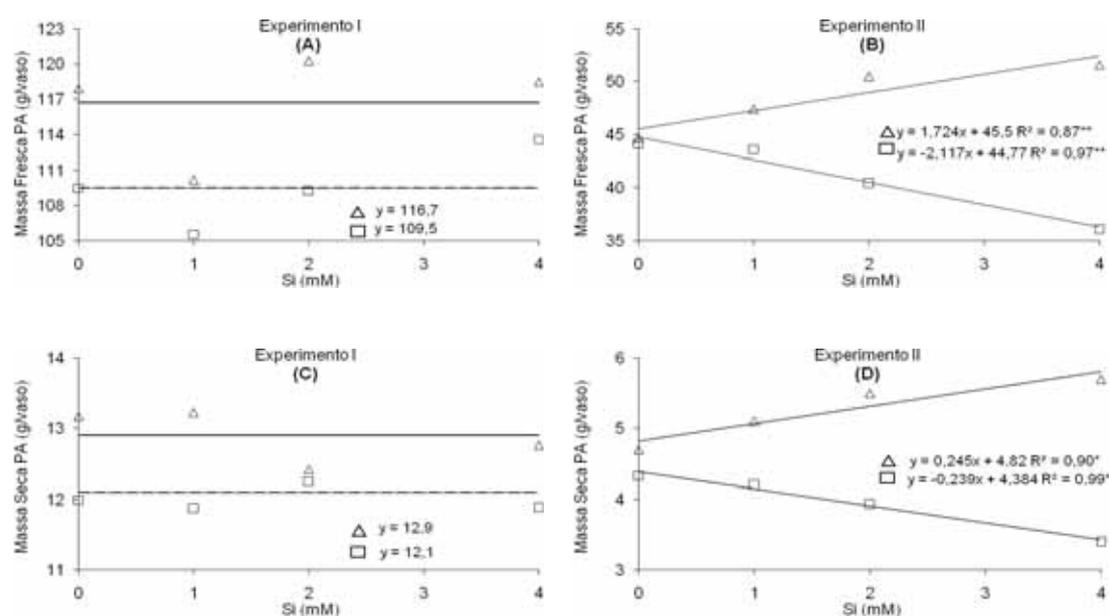


Figura 5. Massa fresca ((A) e (B)) e seca ((C) e (D)) da parte aérea, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al³⁺) e (□) AG8060 (tolerante ao Al³⁺). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

A cultivar Exceler aumentou a massa fresca e seca, no segundo experimento, com o aumento da dose de Si aplicada, concordando com os resultados obtidos por Gunes et al. (2008) que verificaram aumento de produção de matéria seca da parte aérea

com o fornecimento de Si em diferentes cultivares de girassol. O genótipo de milho sensível estudado, pode ter se beneficiado da adição de Si com posterior aplicação do Al, devido a formação de compostos aluminossilicatos na parede celular do córtex das raízes, inibindo o transporte do Al para o protoplasma, impedindo, desta forma, a inibição da atividade enzimática, ou devido ao aumento nas concentrações de ácidos orgânicos no interior de raízes diminuindo a toxidez de Al devido à sua complexação interna por ácidos orgânicos (MA, 2000), mas, a cultivar AG8060, obteve um resultado diferente, reduzindo seu peso com o aumento da dose de Si aplicada.

Mauad et al. (2003) verificaram que a aplicação de doses de Si não proporcionaram alterações significativas na produção da matéria seca na cultura do arroz. Esse resultado está de acordo com o relato de Carvalho (2000) que também não encontrou diferença nesse parâmetro avaliado. A redução na massa fresca e seca, da parte aérea, da cultivar AG8060, no segundo experimento, pode ser devido à presença do Al em solução.

6.5 Teor e acúmulo de silício na raiz

As cultivares apresentaram diferença significativa no teor e acúmulo de Si na raiz dos dois experimentos realizados (Tabela 6). A cultivar exceler gerou maior teor e acúmulo de Si quando comparada com a cultivar AG8060, sendo assim, mais eficiente em absorver e acumular Si. Os mecanismos que envolvem a absorção e o transporte de Si pelas plantas são muito complexos, dependendo não somente das espécies envolvidas, mas também do suprimento (LIANG et al., 2007).

Segundo Giongo e Bohnen (2011) avaliando as interações que ocorrem entre Al, Ca e Si no crescimento de dois genótipos de milho, um tolerante e outro sensível à toxidez por Al, observou que a relação Si/Al atuou em algum mecanismo que possibilitou o acúmulo diferencial de Si entre os genótipos de milho. Os depósitos de Si na parede celular não são puramente um processo físico relacionado com a taxa de transpiração, são controlados metabólica e temporalmente (SANGSTER et al., 2001).

As alterações podem ocorrer devido às mudanças de metabólitos que interagem com Si (KAMENIDOU et al., 2009). Por isso, ocorreram diferenças nas concentrações de Si entre os genótipos de milho sensível e tolerante ao estresse de alumínio, no tratamento contendo Si e Al. Possivelmente, no genótipo sensível, o Si acumulou no

sistema radicular onde se expressa a toxidez de Al^{3+} . A variação no tempo de exposição das cultivares à solução contendo Si nos dois experimentos não influenciou nesses parâmetros avaliados.

Os tratamentos não influenciaram os teores de Si na raiz das duas cultivares nos dois experimentos (Figura 6 (A) e (B)). Já Giongo e Bohnen (2011) avaliando as interações que ocorrem entre Al, Ca e Si no crescimento de dois genótipos de milho, um tolerante e outro sensível à toxidez do alumínio, encontraram maiores concentrações de silício na raiz nos tratamentos que adicionaram silício em solução mesmo na presença do alumínio quando comparado com os tratamentos sem adição de Si.

Tabela 6. Teor e acúmulo de Si na raiz, no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.

Cultivares	Teor de silício (raiz)		Acúmulo de silício (raiz)	
	Experimento I	Experimento II	Experimento I	Experimento II
	----- g kg ⁻¹ -----		----- mg vaso ⁻¹ -----	
Exceler*	1,65 a	1,08 a	10,04 a	2,7 a
AG 8060*	1,09 b	0,65 b	5,50 b	2,0 b
CV%	34,08	42,30	27,14	23,90

Médias seguidas de letras diferentes, na coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Exceler (sensível Al^{3+}) e *AG8060 (tolerante Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

Os tratamentos também não influenciaram o acúmulo de Si na raiz das duas cultivares no primeiro experimento (Figura 6 (C)). O Si é absorvido pelas gramíneas, de modo geral, em grandes quantidades. Em muitas espécies, inclusive, os teores encontrados nos tecidos superam aqueles existentes para N e K, nutrientes majoritários nas plantas (LIMA FILHO et al. 1999).

No segundo experimento o acúmulo de Si na raiz da cultivar Exceler não modificou com os tratamentos adicionados (Figura 6 (D)), mas, influenciou o acúmulo de Si da cultivar AG8060 reduzindo linearmente o acúmulo de Si com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 6 (D)). Esse comportamento de redução no acúmulo de Si na raiz da cultivar

AG8060 com o aumento da dose de Si aplicada pode ter ocorrido devido ao menor tempo que a cultivar ficou em contato com Si, quando comparada com o tempo de exposição do primeiro experimento e ao tempo em contato com Al.

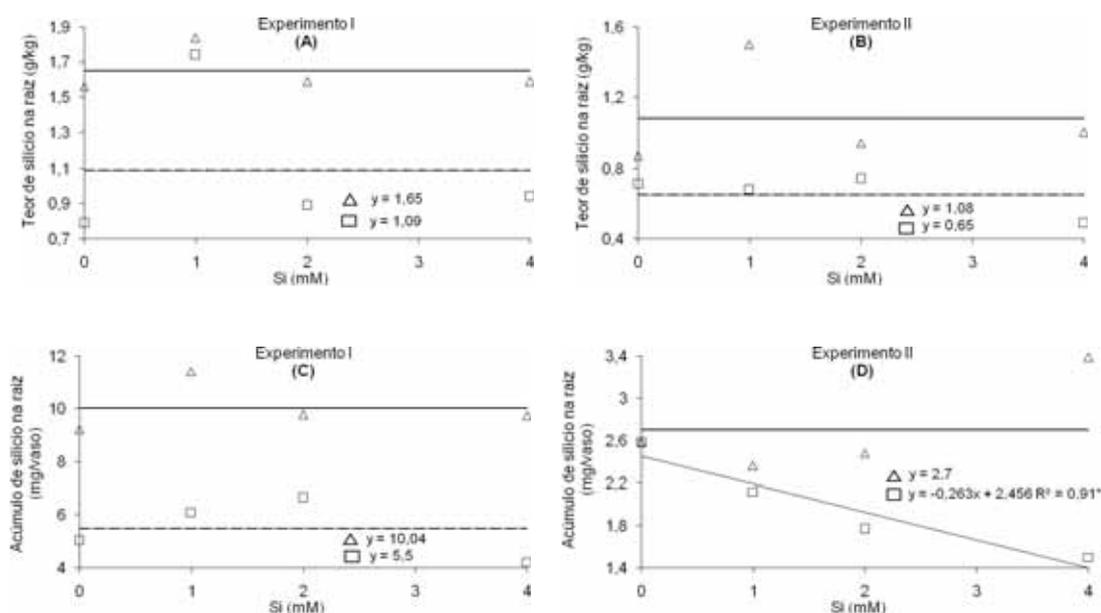


Figura 6. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de Si, na raiz, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

6.6 Teor e acúmulo de silício na parte aérea

O teor de Si no primeiro experimento, não apresentou diferença significativa entre as cultivares, mas, apresentou no segundo experimento. A cultivar AG8060 adquiriu maior teor de Si na parte aérea quando comparado com a cultivar Exceler (Tabela 7). Giongo e Bohnen (2011) observaram que a concentração de Si na parte aérea dos genótipos de milho diminuiu quando o Al estava presente em solução principalmente no genótipo tolerante ao Al^{3+} . O menor teor de Si obtido pela cultivar Exceler no segundo experimento quando comparado com a cultivar AG8060 pode ser devido ao menor tempo em solução com Si não sendo suficiente para adquirir resistência e igualar ou ultrapassar o teor de Si da cultivar

resistente. O acúmulo de Si na parte aérea nos dois experimentos não apresentou diferença significativa entre as duas cultivares (Tabela 7).

Tabela 7. Teor e acúmulo de Si na parte aérea, no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.

Cultivares	Teor de silício (parte aérea)		Acúmulo de silício (parte aérea)	
	Experimento I	Experimento II	Experimento I	Experimento II
	----- g kg ⁻¹ -----		----- mg vaso ⁻¹ -----	
Exceler*	1,20 a	1,88 b	14,15 a	9,84 a
AG 8060*	1,10 a	2,44 a	12,07 a	10,35 a
CV%	28,39	12,57	29,07	9,38

Médias seguidas de letras diferentes, na coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Exceler (sensível Al³⁺) e *AG8060 (tolerante Al³⁺). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

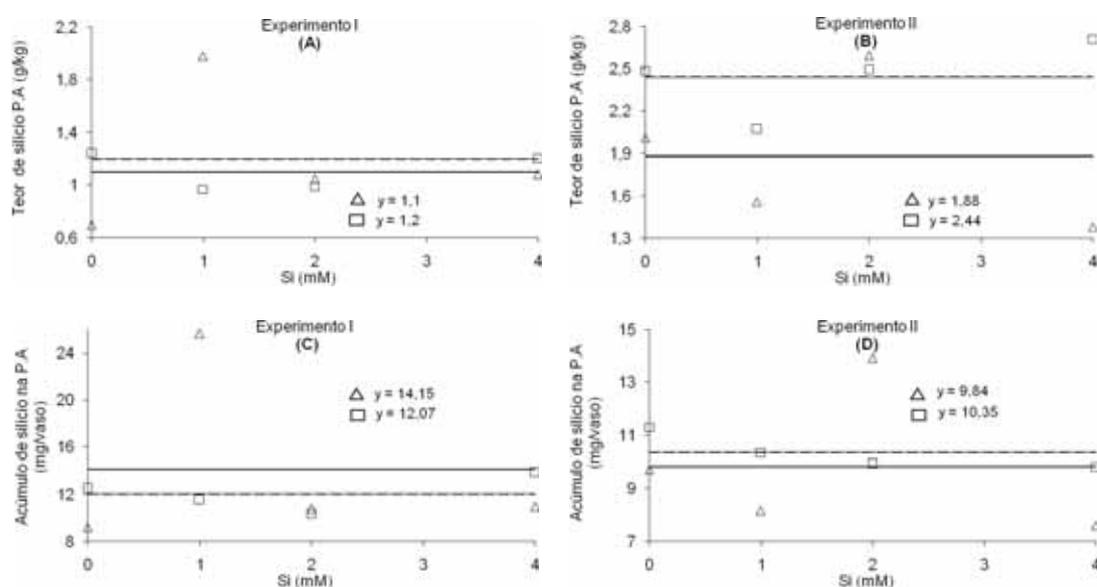


Figura 7. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de Si, na parte aérea, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível ao Al³⁺) e (□) AG8060 (tolerante ao Al³⁺). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

O teor e acúmulo de Si na parte aérea das duas cultivares nos dois experimentos não apresentaram diferença significativa com os tratamentos adicionados (Figura 7 (A), (B), (C) e (D)), diferindo dos resultados obtidos por Giongo e Bohnen (2011) onde as concentrações de Si no tecido vegetal da parte aérea dos genótipos de milho diferiram significativamente entre os tratamentos, sendo que a presença do Si na solução promoveu o aumento da concentração deste elemento na parte aérea. Nanayakara et al. (2008) trabalhando com azevém perene observaram que a concentração de Si no tecido vegetal aumentou com o aumento de fontes de Si aplicadas no solo. Mauad et al. (2003) observaram um aumento no teor e acúmulo de Si na planta de arroz com o aumento da dose de Si aplicada no solo.

6.7 Teor e acúmulo de fenóis solúveis totais na raiz

O teor de Fenóis na raiz no primeiro experimento apresentou diferença significativa entre as cultivares, mas não apresentou diferença no segundo experimento. No primeiro experimento a cultivar Exceler apresentou maior teor quando comparado com a cultivar AG8060 (Tabela 8), mostrando uma eficiência dessa cultivar em produzir fenóis, mesmo em condições adversas. O tempo de exposição em solução com Si no primeiro experimento foi suficiente para mostrar a diferença entre as cultivares diferentemente do segundo experimento que não apresentou diferença provavelmente devido ao menor tempo que as cultivares ficaram em contato com o Si em solução.

O acúmulo de fenóis na raiz do primeiro experimento não apresentou diferença significativa entre as cultivares, mas apresentou no segundo experimento. Nesse parâmetro avaliado, a cultivar tolerante ao Al^{3+} conseguiu acumular mais fenóis quando comparada com a cultivar Exceler, sendo mais eficiente em acumular fenóis, quando o tempo de exposição em solução contendo silício for menor. Os resultados também mostram que quando as plantas ficaram maior tempo em contato com Si em solução no primeiro experimento o acúmulo de fenóis nas cultivares foi quase o dobro do acúmulo obtido pelas cultivares no segundo experimento (Tabela 8). Kidd et al. (2001), trabalhando com 3 genótipos de milho observaram que a exsudação de fenóis aumentou com a concentração externa de Al, considerando que esses compostos podem estar envolvidos no processo de tolerância ao Al. Raposeiras et al. (2005) observaram que diversos tipos fenólicos possuem forte capacidade para ligarem-se a íons Al, mesmo sob condições de acidez e que sua

exsudação pelo ápice das raízes pode realmente representar parte de um mecanismo de tolerância a esse elemento.

Tabela 8. Teor e acúmulo de fenóis na raiz, no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.

Cultivares	Teor de fenóis (raiz)		Acúmulo de fenóis (raiz)	
	Experimento I	Experimento II	Experimento I	Experimento II
	----- mg kg ⁻¹ -----		----- mg vaso ⁻¹ -----	
Exceler*	17,67 a	15,65 a	0,102 a	0,05 b
AG 8060*	14,76 b	16,54 a	0,103 a	0,06 a
CV%	5,71	9,48	6,17	10,33

Médias seguidas de letras diferentes, no mesmo experimento, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Exceler (sensível Al³⁺) e *AG8060 (tolerante Al³⁺). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

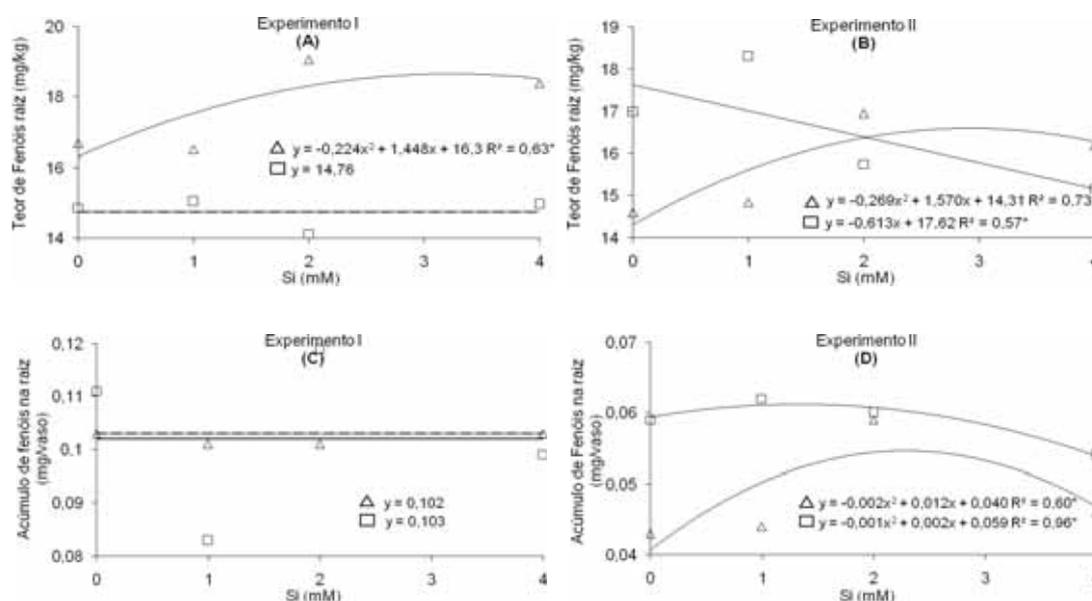


Figura 8. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de fenóis, na raiz, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al³⁺) e (□) AG8060 (tolerante ao Al³⁺). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

O teor de fenóis na raiz da cultivar Exceler modificou com os tratamentos adicionados nos dois experimentos realizados (Figura 8 (A) e (B)). No primeiro experimento o maior teor foi encontrado na dose de $3,23 \text{ mmol L}^{-1}$ e no segundo experimento na dose de $2,92 \text{ mmol L}^{-1}$, apresentando um comportamento parecido mesmo ocorrendo variação no período de exposição das cultivares nos dois experimentos em solução contendo Si. BARCELÓ et al. (2002) observaram que alguns compostos fenólicos podem formar complexos estáveis com o Al^{+3} , contribuindo para a sua desintoxicação nos tecidos. A cultivar AG8060 no primeiro experimento não apresentou diferença significativa no teor de fenóis na raiz quando os tratamentos foram aplicados, mas apresentou no segundo experimento reduzindo linearmente o teor de fenóis com o aumento das doses de Si aplicadas (Figura 8 (A) e (B)), provavelmente essa redução no teor de fenóis ocorreu devido ao menor tempo que a cultivar tolerante ficou em contato com Si em solução.

O acúmulo de fenóis na raiz das duas cultivares no primeiro experimento não apresentou diferença significativa com os tratamentos adicionados (Figura 8 (C)), mas apresentou diferença no segundo experimento realizado (Figura 8 (D)). A cultivar Exceler aumentou o acúmulo de fenóis com o aumento da dose de silício obtendo o maior acúmulo na dose de 3 mmol L^{-1} de Si e a cultivar AG8060 na dose de 1 mmol L^{-1} de Si. A diferença observada no comportamento das cultivares em função de doses crescentes de Si nos dois experimentos provavelmente seja devido ao diferente período de contato das cultivares com Si em solução.

6.8 Teor e acúmulo de fenóis solúveis totais na parte aérea

Compostos fenólicos têm várias funções importantes e estão amplamente distribuídos por toda a planta (RAPOSEIRAS et al., 2005). O teor de fenóis, no primeiro experimento, e o acúmulo de fenóis, nos dois experimentos, na parte aérea, não apresentou diferença significativa entre as cultivares (Tabela 9). O teor de fenóis, na parte aérea, do segundo experimento, apresentou diferença significativa entre as cultivares, sendo que a cultivar AG8060 obteve um maior teor quando comparado com a cultivar Exceler (Tabela 9). O menor teor de silício obtido pela cultivar Exceler (sensível), no segundo experimento, quando comparado com a cultivar AG8060, pode ser devido ao menor tempo em solução com silício, não sendo suficiente para adquirir resistência contra a ação deletéria do

Al^{3+} , não conseguindo dessa forma, obter a mesma concentração de fenóis, obtida pela cultivar resistente.

Tabela 9. Teor e acúmulo de fenóis na parte aérea, no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho.

Cultivares	Teor de fenóis (parte aérea)		Acúmulo de fenóis (parte aérea)	
	Experimento I	Experimento II	Experimento I	Experimento II
	----- mg kg ⁻¹ -----		----- mg vaso ⁻¹ -----	
Exceler*	21,04 a	19,76 b	0,250 a	0,090 a
AG 8060*	21,94 a	20,97 a	0,254 a	0,102 a
CV%	7,09	5,66	7,84	6,53

Médias seguidas de letras diferentes, na coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Exceler (sensível Al^{3+}) e *AG8060 (tolerante Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

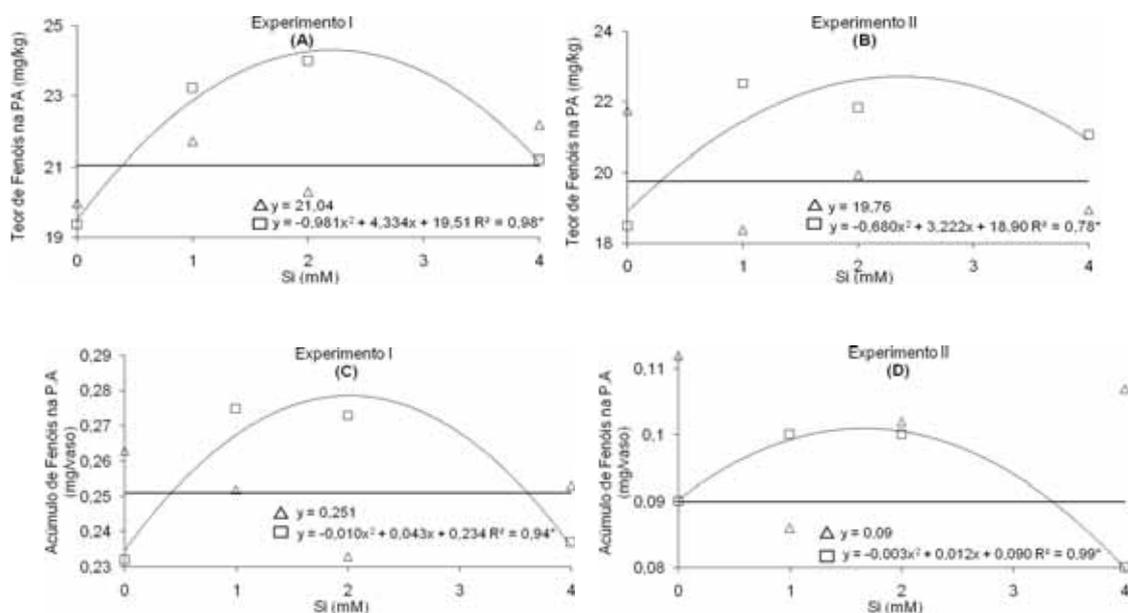


Figura 9. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de fenóis, na parte aérea, nos experimentos I e II, em função da aplicação de doses de Si nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

Os tratamentos não influenciaram significativamente, o teor e acúmulo de fenóis, na parte aérea, da cultivar Exceler, nos dois experimentos realizados, mas influenciaram, o teor e acúmulo de fenóis, da cultivar AG8060 (Figura 9 (A), (B), (C) e (D)). O maior teor e acúmulo de Si, nessa cultivar resistente ao Al^{3+} , nos dois experimentos, foi obtido na dose de $2,21 \text{ mmol L}^{-1}$ (Figura (A)), $2,37 \text{ mmol L}^{-1}$ (Figura (B)), $2,15 \text{ mmol L}^{-1}$ (Figura (C)) e $2,0 \text{ mmol L}^{-1}$ (Figura (D)) de Si. Nesses parâmetros avaliados, as cultivares tiveram o mesmo comportamento, nos dois experimentos, mesmo em diferentes tempo de exposição em solução contendo Si.

6.9 Teor e acúmulo de nutrientes na raiz e parte aérea

6.9.1 Nitrogênio

O teor e o acúmulo de N apresentaram diferença significativa entre as duas cultivares tanto na raiz (Tabela 10) como na parte aérea (Tabela 11) nos dois experimentos. Sendo que a cultivar AG8060 apresentou maior teor e acúmulo desse nutriente nos dois experimentos quando comparado com a cultivar Exceler. Nesses parâmetros avaliados a diferença no tempo de exposição em solução contendo Si nos dois experimentos não diferenciou o comportamento das cultivares. A cultivar Exceler no primeiro experimento aumentou o teor de N na raiz com o aumento da dose de Si, alcançando seu teor máximo na dose de $2,26 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si (Figura 10 (A)). Já, no segundo experimento, a cultivar Exceler reduziu seu teor de N na raiz com o aumento da dose de Si, alcançando seu teor mínimo na dose de $2,59 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si (Figura 10 (B)).

Esse comportamento diferenciado, da cultivar Exceler, sensível ao Al^{3+} nos dois experimentos pode ter ocorrido devido ao diferente tempo de exposição em solução contendo silício. O teor de N na raiz da cultivar AG8060 nos dois experimentos com o aumento da dose de Si diminuiu até atingir um mínimo, $2,21 \text{ mmol L}^{-1}$ (Figura 10 (A)) e $1,19 \text{ mmol L}^{-1}$ (Figura 10 (B)), voltando a aumentar na maior dose aplicada. Para a cultivar tolerante, o menor tempo em contato com Si no segundo experimento não modificou o seu comportamento.

Tabela 10. Teor e acúmulo dos nutrientes na raiz, no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si e Al nas cultivares duas cultivares de milho.

		Teor de nutrientes na raiz										
Cultivares*		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
				g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				
Exp. I	Exceler	23,90 b	1,56 b	38,90 b	1,08 b	0,42 b	6,06 a	42,60 a	23,10 a	300,40 a	101,40 a	26,80 b
	Ag8060	26,10 a	1,71 a	43,50 a	2,00 a	1,33 a	3,56 b	39,80 b	20,80 b	261,10 b	79,00 b	32,70 a
	CV%	3,6	5,2	5,7	13,2	11,5	6,2	7,5	8,3	4,0	19,8	4,9
Exp. II	Exceler	29,30 b	2,69 b	40,30 b	2,00 b	0,74 b	4,71 a	32,50 b	23,80 a	259,00 a	73,80 a	51,80 b
	Ag8060	31,6 a	2,99 a	43,30 a	2,42 a	1,53 a	4,49 a	38,60 a	24,30 a	227,40 b	59,80 b	60,80 a
	CV%	2,50	4,70	4,40	16,80	8,10	7,80	12,50	6,60	14,70	20,90	10,40
		Acúmulo de nutrientes na raiz										
Cultivares*		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
				g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				
Exp. I	Exceler	0,1530 b	0,0104 b	0,2390 b	0,0082 b	0,0028 b	0,0376 a	0,2649 a	0,1486 a	1,8424 a	0,5827 a	0,1723 b
	Ag8060	0,1804 a	0,0117 a	0,3049 a	0,0140 a	0,0103 a	0,0263 b	0,2697 a	0,1484 a	1,8312 a	0,5366 a	0,2305 a
	CV%	5,1	3,4	7,5	5,6	10,6	6,1	8,3	7,5	6,9	14,1	10,1
Exp. II	Exceler	0,0943 b	0,0088 b	0,1297 b	0,0063 b	0,0022 b	0,0150 a	0,1049 b	0,0764 a	0,8355 a	0,2370 a	0,1664 b
	Ag8060	0,1037 a	0,0099 a	0,1428 a	0,0076 a	0,0052 a	0,0148 a	0,1258 a	0,0800 a	0,7519 a	0,1962 b	0,1998 a
	CV%	5,40	9,90	4,80	14,80	14,70	11,00	15,60	8,90	14,10	18,80	10,00

Médias seguidas de letras diferentes, no mesmo experimento, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Exceler (sensível Al³⁺) e *AG8060 (tolerante Al³⁺). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

Tabela 11. Teor e acúmulo dos nutrientes na parte aérea, no experimento I e II, em função da aplicação de doses de Si e Al nas cultivares de milho.

Cultivares*		Teor de nutrientes na parte aérea										
		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
Exp. I	Exceler	27,00 b	1,18 b	34,40 b	3,58 b	1,38 b	1,82 a	33,30 a	8,83 b	68,20 b	55,90 b	30,50 b
	Ag8060	31,30 a	1,28 a	42,80 a	4,33 a	1,58 a	1,70 b	34,10 a	10,0 a	73,40 a	70,80 a	42,80 a
	CV%	3,7	5,8	3,7	12,2	3,6	2,5	6,8	3,7	7,4	5,7	12,9
Exp. II	Exceler	37,80 b	2,52 b	35,40 b	3,83 a	1,43 b	1,87 a	26,60 a	12,30 b	72,50 a	89,80 b	63,40 b
	Ag8060	43,60 a	3,13 a	46,10 a	4,08 a	1,55 a	1,91 a	29,40 a	16,80 a	76,30 a	96,50 a	78,30 a
	CV%	4,1	7,8	5,3	8,7	3,7	4,0	9,9	5,8	7,1	7,9	9,2
Cultivares*		Acúmulo de nutrientes na parte aérea										
		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
Exp. I	Exceler	0,3490 b	0,0163 a	0,4262 b	0,0432 b	0,0183 a	0,0231 a	0,4347 a	0,1128 b	0,9276 a	0,7292 b	0,3891 b
	Ag8060	0,3729 a	0,0150 a	0,5090 a	0,0509 a	0,0195 a	0,0200 b	0,4000 b	0,1207 a	0,8873 b	0,8355 a	0,5033 a
	CV%	4,3	13,1	6,3	6,7	9,9	6,4	5,9	4,6	6,1	5,6	10,2
Exp. II	Exceler	0,1715 b	0,0123 a	0,1815 a	0,0158 b	0,0074 a	0,0097 a	0,1364 a	0,0637 a	0,3730 a	0,4607 a	0,3286 a
	Ag8060	0,1946 a	0,0127 a	0,1819 a	0,0193 a	0,0060 b	0,0077 b	0,1159 b	0,0667 a	0,3020 b	0,3845 b	0,3099 a
	CV%	6,40	8,60	6,50	7,40	5,60	9,90	8,40	8,80	6,60	9,70	9,60

Médias seguidas de letras diferentes, no mesmo experimento, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Exceler (sensível Al³⁺) e *AG8060(tolerante Al³⁺). Experimento I (18 dias com Si) e Experimento II (9 dias com Si).

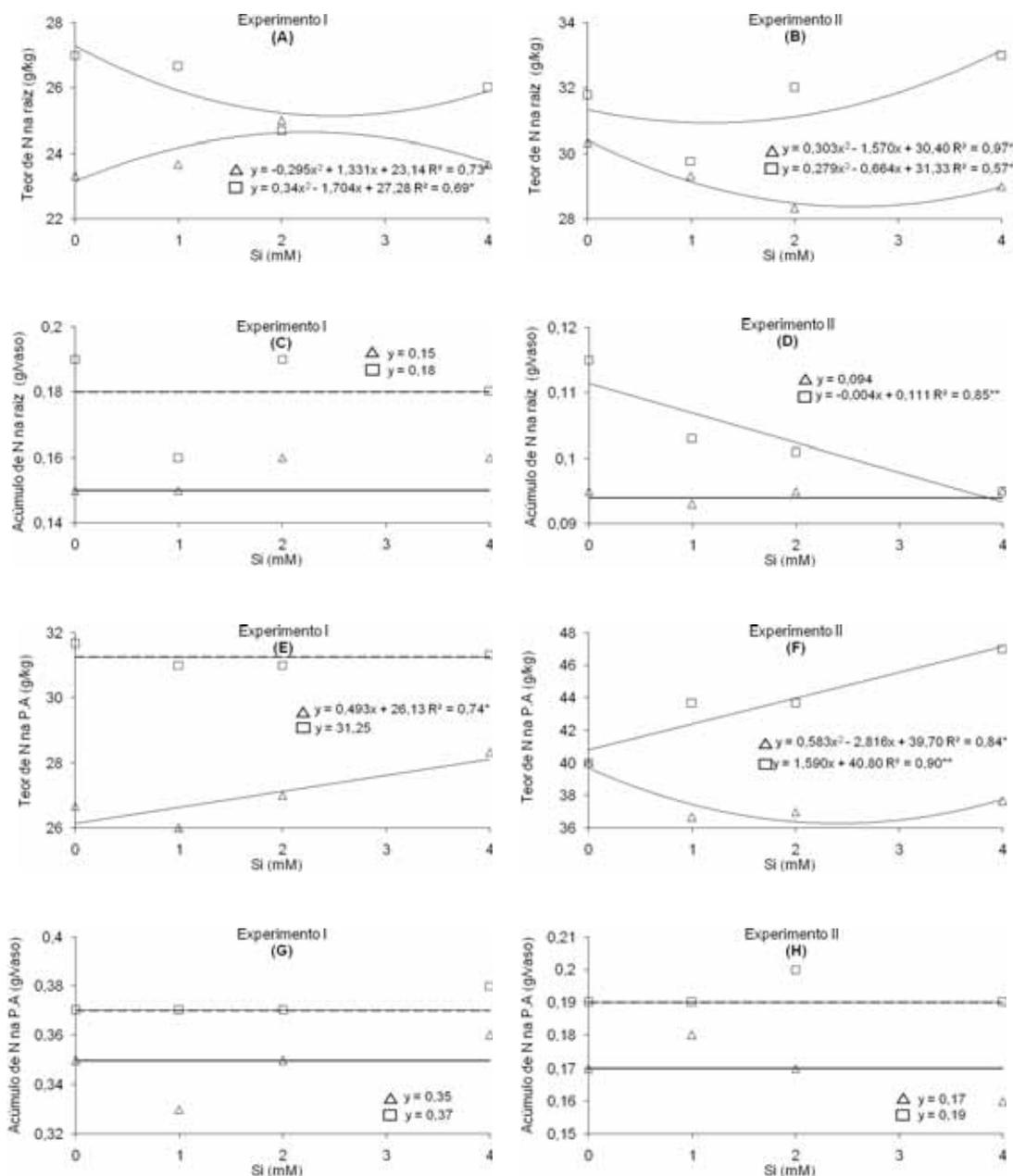


Figura 10. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de nitrogênio na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de nitrogênio, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

O aumento da dose de Si não influenciou o acúmulo de N na raiz nos dois experimentos da cultivar Exceler (Figura 10 (C) e (D)), e também, não influenciou o acúmulo de N na raiz do primeiro experimento da cultivar AG8060 (Figura 10 (C)), influenciando apenas, o acúmulo do segundo experimento da cultivar Exceler (Figura 10 (D)).

Nesse experimento, o acúmulo de N na raiz da cultivar Exceler reduziu com o aumento da dose de Si aplicada em solução não concordando com a hipótese levantada que a presença do Si iria aumentar a resistência da planta impedindo a ação deletéria do Al^{3+} . Neste caso, como a cultivar ficou menos tempo em contato com Si quando comparado com o primeiro experimento, provavelmente não se beneficiou com o Si tornando-se menos resistente às condições adversas do meio.

O teor de N da cultivar Exceler na parte aérea no primeiro experimento aumentou significativamente com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 10 (E)). No segundo experimento o teor de N da cultivar Exceler reduziu com o aumento da dose de Si aplicada, alcançando o menor teor na dose de $2,42 \text{ mmol L}^{-1}$, voltando a aumentar com o aumento da dose aplicada (Figura 10 (F)). O aumento da dose de Si não influenciou significativamente o teor de N na parte aérea da cultivar AG8060 no primeiro experimento (Figura 10 (E)), influenciando no segundo experimento (Figura 10 (F)), sendo que o teor de N na parte aérea aumentou com o aumento da dose de silício aplicada em solução. Esses comportamentos diferenciados das cultivares, nos dois experimentos, pode ser consequência do diferente período em contato com Si em solução. Mauad et al. (2003) não encontraram diferença significativa no teor de nitrogênio, em arroz, com o aumento das doses de Si. O aumento da dose de Si aplicada em solução não influenciou o acúmulo de N das duas cultivares da parte aérea nos dois experimentos (Figura 10 (G) e (H)).

6.9.2 Fósforo

O teor e acúmulo de P na raiz no primeiro e segundo experimento apresentaram diferença significativa entre as duas cultivares (Tabela 10) resultando maior teor e acúmulo na cultivar AG8060 quando comparada com a cultivar Exceler. Nesse parâmetro avaliado, o tempo diferenciado das cultivares em solução contendo Si nos dois experimentos não interferiu no seu comportamento. Na parte aérea o teor de P nos dois experimentos

também apresentou diferença significativa entre as cultivares não apresentando diferença no acúmulo de P (Tabela 11). O teor de P na parte aérea da cultivar AG8060 foi maior quando comparada com a cultivar Exceler, também não sofrendo influência do diferente tempo que ficaram em contato com Si em solução.

O aumento da dose de Si não influenciou o teor de P na raiz nos dois experimentos para a cultivar Exceler (Figura 11 (A) e (B)), e no primeiro experimento para a cultivar AG8060 (Figura 11 (A)). Influenciou apenas o teor de P da cultivar AG8060 na raiz do segundo experimento. Houve uma queda no teor de P com o aumento da dose de Si aplicada, alcançando seu mínimo na dose de $1,34 \text{ mmol L}^{-1}$, voltando a aumentar com o aumento da dose de Si adicionada (Figura 11 (B)). Esse comportamento observado na cultivar tolerante no segundo experimento pode ter ocorrido devido o menor tempo de exposição em solução contendo Si.

A cultivar exceler aumentou o acúmulo de P na raiz no primeiro experimento com o aumento da dose de silício aplicada (Figura 11 (C)) mas não influenciou o acúmulo de P dessa cultivar no segundo experimento (Figura 11 (D)). O acúmulo de P na raiz da cultivar AG8060 do primeiro experimento não apresentou diferença significativa com o aumento da dose de Si (Figura 11 (C)), mas influenciou significativamente, a cultivar AG8060, no segundo experimento (Figura 11 (D)). O maior acúmulo de P na raiz do segundo experimento foi encontrado quando o Si não foi aplicado em solução, reduzindo até a dose de $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si ser aplicada, voltando a aumentar com o aumento da dose aplicada (Figura 11 (D)). Esse comportamento diferenciado das cultivares nos dois experimentos pode ter ocorrido em função de diferente período de contato em solução contendo Si. O aumento da dose de Si não influenciou significativamente o teor de P na parte aérea da cultivar Exceler no primeiro experimento (Figura 11 (E)), influenciando no segundo experimento (Figura 11 (F)).

O teor de P da cultivar Exceler na parte aérea no segundo experimento reduziu com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 11 (F)). A cultivar AG8060 nos dois experimentos aumentou o teor de P na parte aérea com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 11 (E) e (F)). Sobral et al. (2011) aplicando escória (198 g kg^{-1} de SiO_2 total) não observaram incrementos de P na parte aérea da cana-de-açúcar.

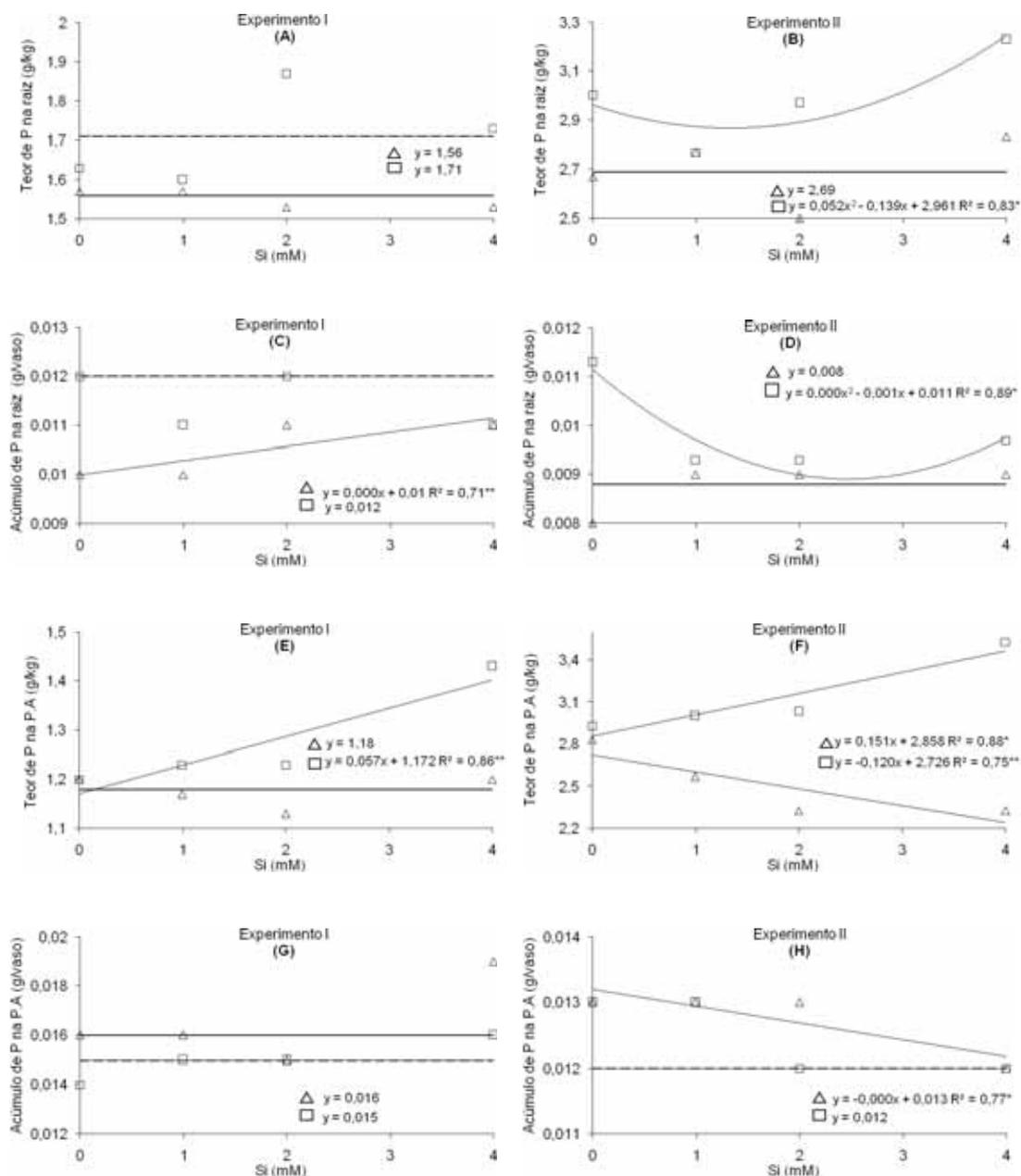


Figura 11. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de fósforo na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de fósforo, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho (Δ) Excelsor (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

Os tratamentos não influenciaram significativamente o acúmulo de P na parte aérea nos dois experimentos da cultivar AG8060 (Figura 11 (G) e (H)) e no primeiro experimento da cultivar Exceler (Figura 11 (G)), influenciando apenas, o acúmulo de P no segundo experimento da cultivar Exceler (Figura 11 (H)) gerando queda no acúmulo de P com o aumento da dose de Si. Provavelmente, a queda no acúmulo de P na parte aérea da cultivar sensível no segundo experimento ocorreu devido ao menor tempo de exposição dessa cultivar em solução contendo Si, não conseguindo beneficiá-la ao ponto de conseguir aumentar seu teor de fósforo em solução contendo Al^{3+} . O Al em níveis tóxicos na solução do solo interfere na movimentação do fósforo (OLMOS e CAMARGO,1976). Os mecanismos de tolerância ao Al conhecidos se resumem basicamente em duas classes: os que agem no sentido de expulsar o Al depois de absorvido ou de impedir sua entrada pela raiz e os mecanismos de desintoxicação, complexando o Al em organelas específicas da planta, principalmente nos vacúolos (BERTAN et al.,2007).

6.9.3 Potássio

A cultivar AG8060 apresentou maior teor e acúmulo de K na raiz nos dois experimentos quando comparado com a cultivar Exceler (Tabela 10). Provavelmente devido a cultivar Exceler ser sensível ao Al^{3+} . Em cultivo hidropônico em tratamentos com Al, Freitas et al. (2006) observaram significativa redução da absorção do K em genótipos de arroz. Nesses parâmetros avaliados, o diferente período de contato em solução contendo Si nos dois experimentos não interferiu no comportamento das cultivares.

O teor de K na parte aérea nos dois experimentos também foi maior na cultivar AG8060 (Tabela 11). O acúmulo de K na parte aérea das cultivares, no primeiro experimento, modificou significativamente, sendo que, a cultivar AG8060 obteve um maior acúmulo quando comparado com a cultivar Exceler (Tabela 11), mas não modificou significativamente no segundo experimento, provavelmente devido ao menor tempo de exposição desses cultivares em solução contendo Si (Tabela 11).

As doses de Si influenciaram o teor de K na raiz nos dois experimentos da cultivar Exceler (Figura 12 (A) e (B)), e no segundo experimento da cultivar AG8060 (Figura 12 (B)), não influenciando o teor de K da cultivar Exceler no primeiro experimento (Figura 12 (A)). No primeiro experimento a cultivar Exceler aumentou o teor de K com o

aumento da dose de Si, alcançando o teor máximo quando a dose de 2,46 mmol L⁻¹ foi aplicada, voltando a cair com o aumento da dose foi aplicada (Figura 12(A)). No segundo experimento a cultivar Exceler aumentou linearmente o teor de K na raiz com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 12 (B)), concordando com a hipótese levantada.

E o diferente período de contato em solução contendo Si da cultivar Exceler nos dois experimentos não interferiu em seu comportamento (Figura 12 (B)). A cultivar AG8060 reduziu o teor de K com o aumento da dose de Si, reduzindo o seu teor até a dose de 2,38 mmol L⁻¹ de Si, voltando a aumentar com o aumento da dose aplicada (Figura 12 (B)). Essa redução no teor de K na raiz da cultivar tolerante no segundo experimento, provavelmente, seja conseqüência do menor tempo em contato com Si em solução, mas mantendo o mesmo período de estresse com Al³⁺.

O acúmulo de K na raiz do primeiro experimento nas duas cultivares não apresentou diferença significativa com os tratamentos aplicados (Figura 12 (C)). No segundo experimento o acúmulo de potássio da cultivar Exceler na raiz aumentou linearmente com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 12 (D)), concordando com a hipótese levantada que a presença do Si iria beneficiar a cultivar, reduzindo assim, os efeitos deletérios do alumínio tóxico em solução. A cultivar AG8060 reduziu o acúmulo de K até a dose de 2,86 mmol L⁻¹ aplicada, voltando a aumentar com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 12 (D)). O comportamento assumido por essa cultivar no segundo experimento pode ser devido ao menor tempo de contato com Si em solução.

Os tratamentos não influenciaram significativamente o teor de K das duas cultivares de milho na parte aérea nos dois experimentos realizados (Figura 12 (E) e (F)). Sobral et al. (2011) aplicando escória (198 g kg⁻¹ de SiO₂ total) não observaram incrementos de K na parte aérea da cana-de-açúcar, e nesse parâmetro, as cultivares não modificaram seu comportamento em função de diferente período em contato com Si em solução. Os tratamentos não influenciaram o acúmulo de K das duas cultivares na parte aérea no primeiro experimento (Figura 12 (G)) e o acúmulo de K da cultivar Exceler no segundo experimento (Figura 12 (H)). A cultivar AG8060 reduziu o acúmulo de K na parte aérea com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 12 (H)). O comportamento assumido por essa cultivar no segundo experimento pode ser devido ao menor tempo de contato com Si em solução.

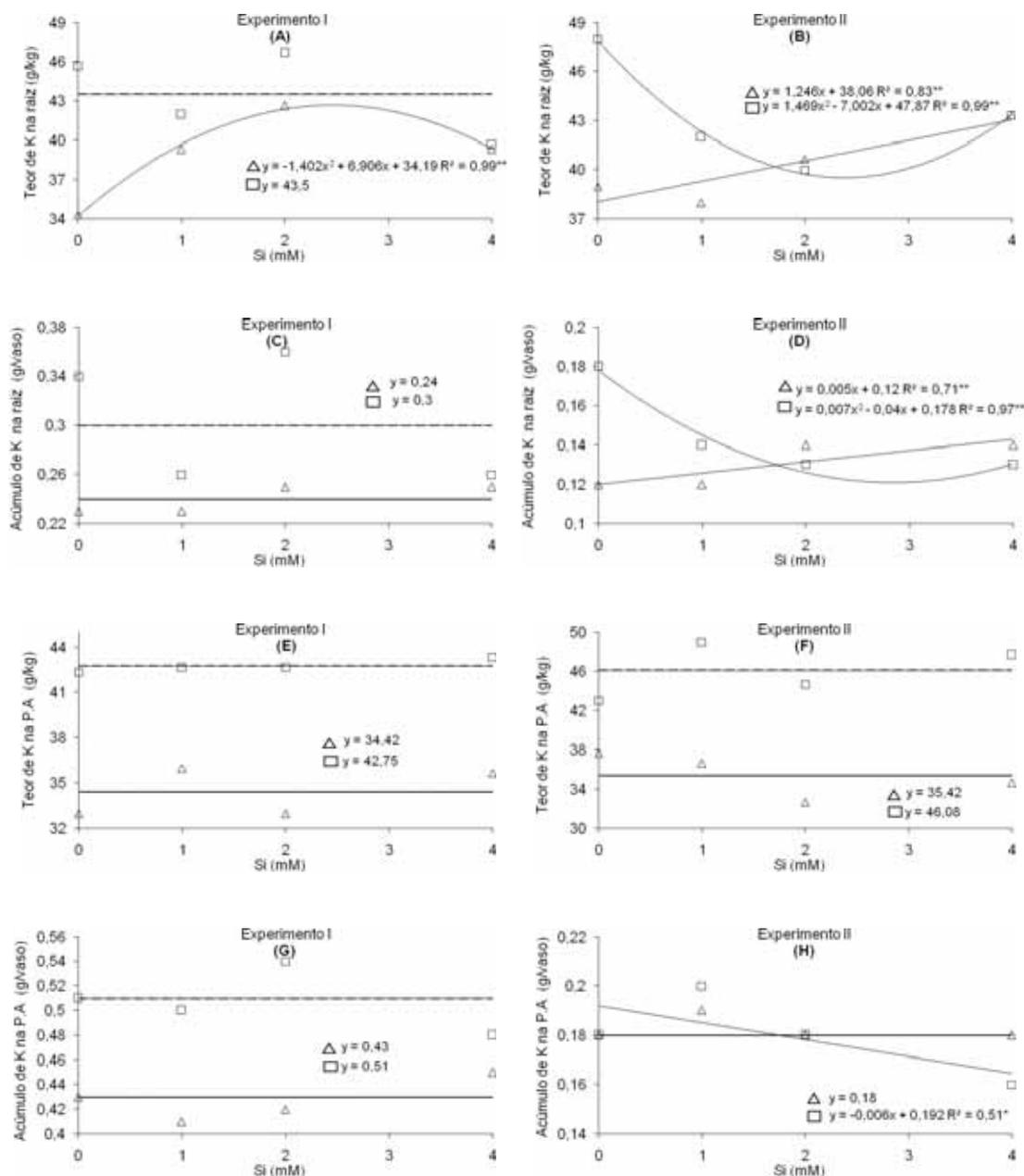


Figura 12. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de potássio na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de potássio, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

6.9.4 Cálcio

O teor e acúmulo de Ca na raiz nos dois experimentos apresentaram diferença significativa entre as cultivares (Tabela 10). A cultivar AG8060 obteve um maior teor e acúmulo de Ca quando comparado com a cultivar Exceler. O diferente período de contato das cultivares em solução contendo Si nos dois experimentos não interferiu no seu comportamento. O Ca possui a função de componente estrutural e também como mensageiro secundário na condução de sinais de fatores do ambiente (MCAINSH e HETHERINGTON, 1998), e respostas das plantas em termos de crescimento e desenvolvimento, por isso, alterações nas concentrações de Ca podem influenciar significativamente o desenvolvimento das plantas (GIONGO e BOHNEN, 2011). No experimento realizado por Giongo e Bohnen (2011), o genótipo tolerante ao Al apresentou maior teor de Ca na raiz em relação ao genótipo sensível no tratamento contendo Si, mas no tratamento contendo Si e Al foi a cultivar sensível que obteve maior teor de Ca na raiz.

O teor de Ca na parte aérea apresentou diferença significativa entre os cultivares no primeiro experimento, mas não apresentou diferença no segundo experimento (Tabela 11). O teor de Ca na parte aérea no primeiro experimento foi maior na cultivar AG8060. Provavelmente, o teor de Ca no segundo experimento não apresentou o mesmo comportamento devido ao menor tempo em contato com Si em solução. O menor teor de Ca encontrado na cultivar sensível na parte aérea com a presença do Al^{3+} , provavelmente venha dos danos causados nas células envolvidas no processo de absorção e transporte de Ca, reduzindo a absorção de cálcio, principalmente na cultivar sensível ao Al^{3+} . Os danos causados pelo Al nas regiões meristemáticas das raízes primárias e laterais ocorrem a ponto de se tornar difícil à distinção de coifa e elementos vasculares (PIÑEROS et al., 2002).

O acúmulo de Ca na parte aérea apresentou diferença significativa entre as cultivares (Tabela 11). Nos dois experimentos, o acúmulo de Ca na parte aérea foi maior na cultivar AG8060 quando comparado com a cultivar Exceler, mostrando um comportamento parecido nos dois experimentos mesmo modificando o período de contato com Si em solução. Nesse caso é observado que a cultivar AG8060 possui uma maior eficiência em acumular Ca mesmo em contato com Al^{3+} quando comparado com a cultivar Exceler.

As doses de Si não influenciaram significativamente o teor de Ca na raiz das duas cultivares nos dois experimentos realizados (Figura 13 (A) e (B)). O diferente período de exposição em solução contendo Si não interferiu no comportamento das cultivares nos dois experimentos.

Já no experimento realizado por Giongo e Bohnen (2011), o tratamento contendo Al apresentou maior teor de Ca em relação aos tratamentos sem Si. O aumento na concentração de Ca quando adicionado Si em solução pode ocorrer devido à inibição da ligação do alumínio com as proteínas carregadoras de Ca em função do Si, possibilitando a entrada do Ca no simplasto e o posterior transporte da raiz para parte aérea (GIONGO e BOHNEN, 2011).

As doses de Si também não influenciaram o acúmulo de Ca na raiz da cultivar AG8060 nos dois experimentos (Figura 13 (C) e (D)) e da cultivar Exceler no segundo experimento (Figura 13 (D)), mas influenciou o acúmulo de Ca na cultivar Exceler no primeiro experimento, ocorrendo uma redução no acúmulo até a dose de $1,14 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si ser aplicada, aumentando posteriormente com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 13 (C)). O Al em níveis tóxicos na solução do solo interfere na movimentação do Ca (OLMOS e CAMARGO, 1976).

Os tratamentos também não influenciaram significativamente o teor de Ca na parte aérea das duas cultivares nos dois experimentos (Figura 13 (E) e (F)), sendo assim, o diferente período em contato com Si das cultivares, nos dois experimentos, não interferiu no comportamento delas. A cultivar Exceler no segundo experimento não sofreu influência no acúmulo de Ca na parte aérea quando as doses de silício foram aplicadas em solução (Figura 13 (H)), mas sofreu influência no primeiro experimento.

A cultivar Exceler no primeiro experimento obteve o menor acúmulo de Ca na parte aérea na dose de 3 mmol L^{-1} de Si (Figura 13 (G)). O acúmulo de Ca da cultivar AG8060 na parte aérea do primeiro experimento aumentou o acúmulo até a dose de $1,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si, diminuindo com o aumento da dose aplicada (Figura 13 (G)), e no segundo experimento, diminuiu linearmente o acúmulo de Ca com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 13 (H)).

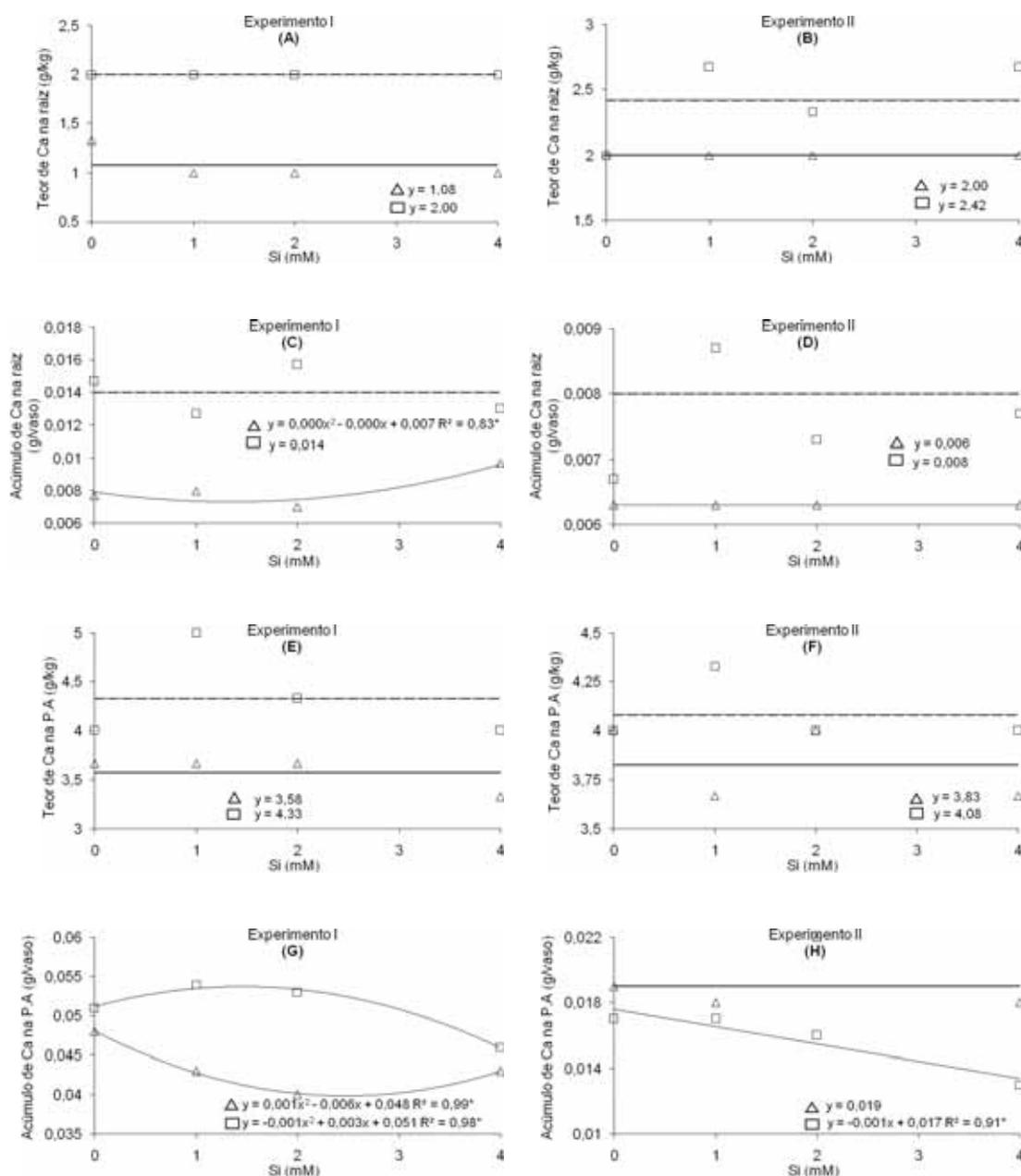


Figura 13. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de cálcio na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de cálcio, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

O comportamento da cultivar Exceler no acúmulo de Ca na parte aérea no segundo experimento foi diferente do primeiro, provavelmente devido ao menor tempo em contato com Si em solução, não sendo suficiente para mostrar resposta. Na presença de Si, as concentrações de Ca podem ser alteradas influenciando o processo de divisão celular (GIONGO e BOHNEM, 2011). O Ca, além de atuar como componente estrutural, apresenta também importante função como mensageiro secundário na condução de sinais de fatores do ambiente e resposta das plantas em termos de crescimento e desenvolvimento (VITTI et al., 2006). Esta interação foi verificada por Silva e Bohnem (2001) que obtiveram maior quantidade de Ca em plantas de arroz não tratadas com Si em relação às tratadas.

6.9.5 Magnésio

O teor e acúmulo de Mg na raiz nos dois experimentos apresentaram diferença significativa entre as cultivares (Tabela 10). A cultivar AG8060 apresentou maior teor e acúmulo de Mg na raiz quando comparado com a cultivar Exceler, sendo mais eficiente em absorver e acumular Mg, mesmo em condições adversas (alumínio em solução). O diferente período de contato das cultivares com Si em solução nos dois experimentos não interferiu no comportamento delas. O Al em níveis tóxicos na solução do solo interfere na movimentação do Mg (OLMOS e CAMARGO, 1976) podendo, dessa forma, ter interferido na absorção de Mg da cultivar sensível ao Al^{3+} .

O teor de Mg na parte aérea nos dois experimentos e o acúmulo de Mg na parte aérea no segundo experimento apresentou diferença significativa entre as cultivares, mas não apresentou diferença significativa no acúmulo de Mg na parte aérea no primeiro experimento (Tabela 11). O teor de Mg na cultivar AG8060 foi maior quando comparado com a cultivar Exceler nos dois experimentos, sendo mais eficiente em absorver esse elemento. O comportamento das cultivares nos dois experimentos não modificou com a mudança no tempo de contato em solução contendo Si.

As doses de Si não influenciaram significativamente no teor de Mg na raiz das duas cultivares no primeiro experimento (Figura 14 (A)), e na cultivar Exceler do segundo experimento (Figura 14 (B)), mas modificou o teor de Mg na raiz da cultivar AG8060 no segundo experimento ocorrendo redução no teor com o aumento das doses aplicadas, até atingir o menor teor de Mg na dose de $1,42 \text{ mmol L}^{-1}$ aplicada (Figura 14 (B)). Esse

comportamento da cultivar tolerante (AG8060) no segundo experimento em relação ao primeiro pode ser devido ao menor tempo em contato com a solução contendo Si.

O acúmulo de Mg na raiz da cultivar Exceler nos dois experimentos não modificou significativamente em função das doses de Si aplicadas, modificando somente o acúmulo da cultivar AG8060 (Figura 14 (C) e (D)).

O menor acúmulo de Mg na raiz da cultivar AG8060 nos dois experimentos foi encontrado na maior dose de silício aplicada (Figura 14 (C)), não concordando com a hipótese levantada. O diferente período em contato com Si em solução dos dois experimentos não interferiu no comportamento das cultivares.

O teor de Mg na parte aérea das duas cultivares do primeiro experimento modificou significativamente com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 14 (E)), e o menor teor foi encontrado na cultivar Exceler quando a dose de $1,93 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si foi aplicada em solução, já na cultivar AG8060 o resultado encontrado foi diferente, gerando maior teor de Mg na parte aérea na dose de $1,95 \text{ mmol L}^{-1}$ (Figura 14 (E)). Os tratamentos não influenciaram significativamente o teor de Mg na parte aérea das duas cultivares no segundo experimento (Figura 14 (F)). Provavelmente, as cultivares no segundo experimento não apresentaram diferença como no primeiro experimento devido ao menor tempo em contato com Si em solução.

Os tratamentos não influenciaram significativamente, o acúmulo de Mg na parte aérea das duas cultivares no primeiro experimento (Figura 14 (G)) influenciando o acúmulo do nutriente no segundo experimento (Figura 14 (H)). A cultivar Exceler aumentou o acúmulo de Mg na parte aérea do segundo experimento com o aumento da dose de Si aplicada, até a dose $2,6 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si, aumentando posteriormente o acúmulo com o aumento da dose aplicada em solução, e a cultivar AG8060 reduziu o acúmulo de Mg linearmente com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 14 (H)), e provavelmente, esse resultado seja consequência do menor tempo dessa cultivar em contato com Si em solução, não conseguindo, dessa forma, obter um aumento no acúmulo do nutriente com o aumento da dose de Si em solução, contendo alumínio.

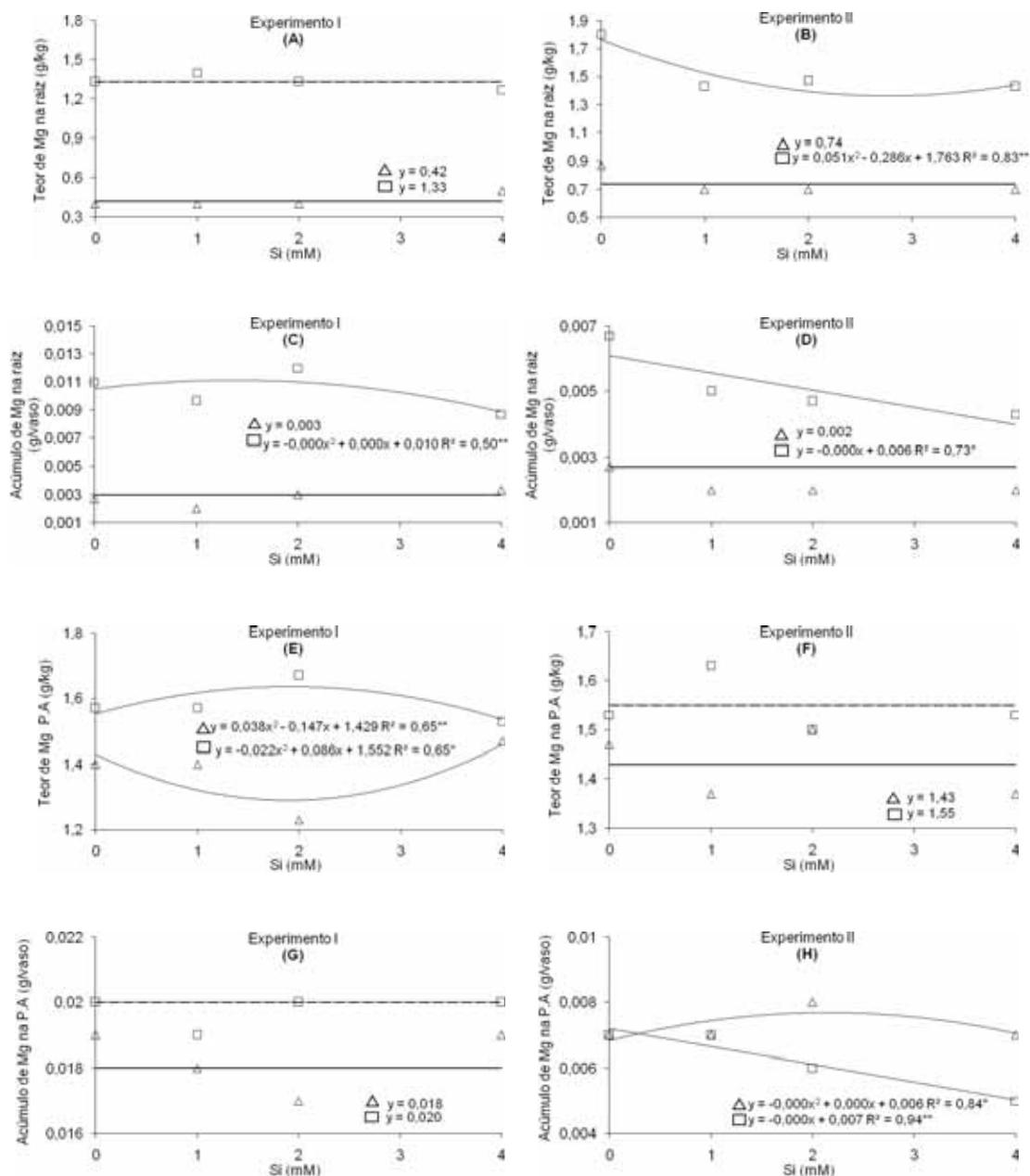


Figura 14. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de magnésio, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de magnésio, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho (Δ) Excelsa (sensível ao Al^{3+} alumínio e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

6.9.6 Enxofre

O teor e acúmulo de S na raiz no primeiro experimento apresentou diferença significativa entre as cultivares, sendo que a cultivar Exceler apresentou maior teor e acúmulo de S quando comparada com a cultivar AG8060 (Tabela 10), já no segundo experimento, o teor e acúmulo de S na raiz não apresentou diferença significativa entre as cultivares (Tabela 10). A diferença entre as cultivares não foi verificada no segundo experimento provavelmente devido ao menor tempo que as cultivares ficaram em contato com Si em solução.

O teor de S na parte aérea no primeiro experimento e o acúmulo de S nos dois experimentos apresentaram diferença significativa entre as cultivares, e como apresentado pelas raízes, a cultivar Exceler adquiriu maior teor e acúmulo quando comparada com a cultivar AG8060, sendo mais eficiente em absorver e acumular S na parte aérea (Tabela 11). Provavelmente, no segundo experimento não foi observada diferença significativa entre as cultivares no teor de S na parte aérea (Tabela 11) em função do menor tempo em contato com Si em solução.

A cultivar Exceler no primeiro experimento aumentou o teor de S na raiz com o aumento da dose de Si aplicada, alcançando o maior teor quando a dose de 2,24 mmol L⁻¹ de Si foi aplicada, reduzindo posteriormente com o aumento da dose de Si aplicada em solução (Figura 15 (A)), e o teor de S na raiz da cultivar AG8060 reduziu linearmente com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 15 (A)). A cultivar Exceler no segundo experimento não apresentou diferença com os tratamentos utilizados (Figura 15 (B)), mas, a cultivar AG8060 reduziu o teor de S na raiz até a dose de 1,71 mmol L⁻¹ de Si aplicada, voltando a aumentar o teor com o aumento da dose de Si aplicada em solução (Figura 15 (B)). A queda no teor de S em função de aplicação de doses crescentes de Si não vai de acordo com a hipótese levantada. O comportamento diferenciado das cultivares nos dois experimentos pode ser em razão do menor tempo em contato com Si do segundo experimento (Figura 15 (A) e (B)).

As doses de Si não influenciaram significativamente o acúmulo de S na raiz da cultivar AG8060 nos dois experimentos (Figura 15 (C) e (D)), e da cultivar Exceler no segundo experimento (Figura 15 (D)).

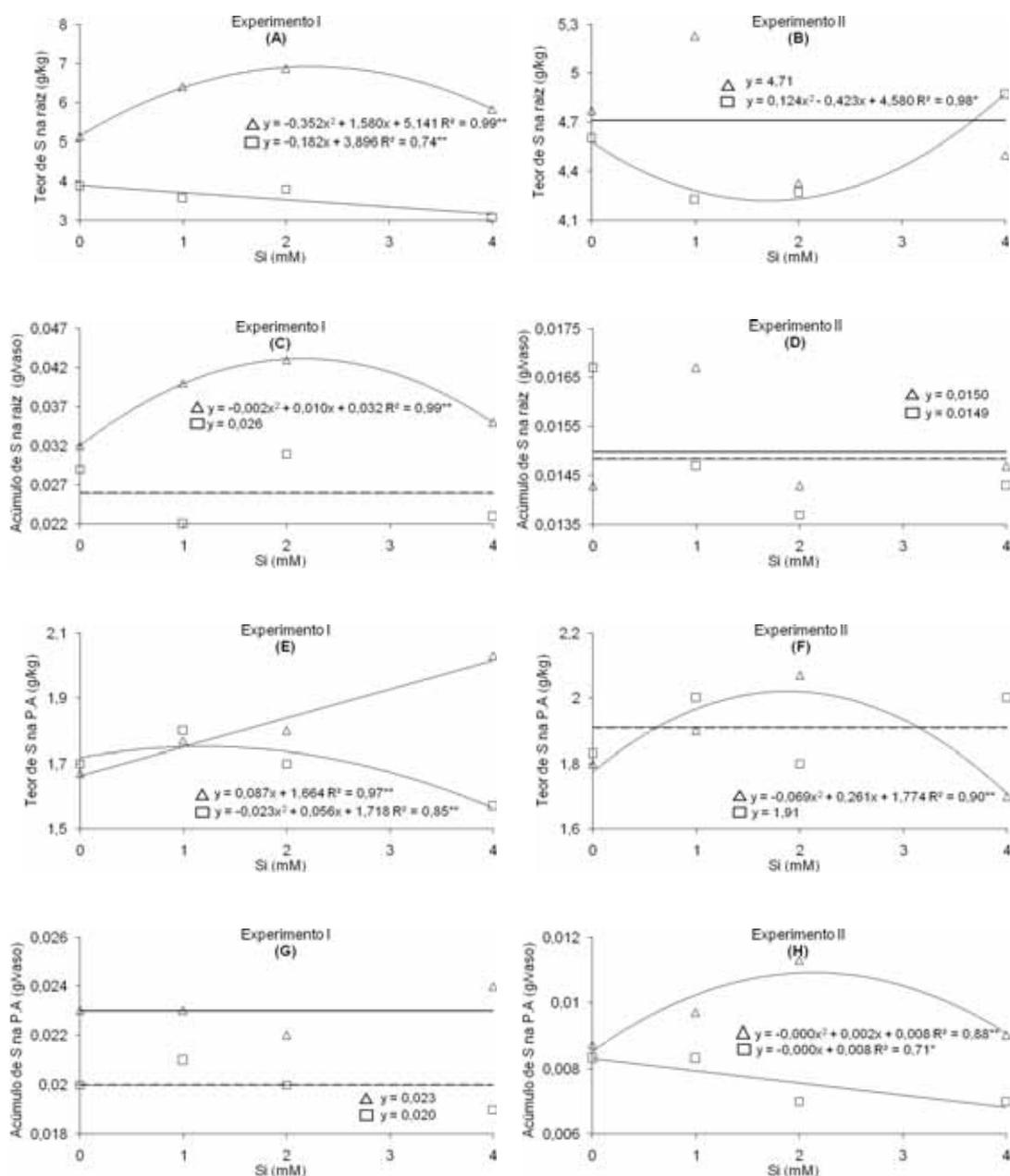


Figura 15. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de enxofre, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de enxofre, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho (Δ) Excelsor sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

No primeiro experimento o acúmulo de S aumentou com o aumento da dose de Si aplicada até a dose de $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si, voltando a cair com o aumento da dose de Si aplicada em solução (Figura 15 (C)). A falta de resultados significativos do segundo experimento no acúmulo de enxofre na raiz pode estar relacionado com o menor tempo em contato com silício em solução dessas cultivares (Figura 15 (D)).

O teor de enxofre na parte aérea da cultivar Exceler no primeiro experimento aumentou significativamente com o aumento da dose de Si adicionada (Figura 15 (E)), e o teor de S na cultivar AG8060 aumentou até a dose de $1,22 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si ser aplicada, reduzindo posteriormente com o aumento da dose de Si aplicada em solução (Figura 15 (E)). No segundo experimento a cultivar Exceler aumentou o teor de S na parte aérea até a dose de $1,89 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si ser aplicada, voltando a diminuir com o aumento da dose aplicada em solução (Figura 10 (F)).

As doses de Si aplicadas não influenciaram significativamente o teor de enxofre da cultivar AG8060 da parte aérea no segundo experimento (Figura 15 (F)). Os resultados diferentes da cultivar AG8060 encontrados nos dois experimentos pode ser consequência do período diferenciado em contato com Si em solução. As doses de Si não influenciaram o acúmulo de S na parte aérea das duas cultivares no primeiro experimento (Figura 15 (G)), mas influenciaram no segundo experimento (Figura 15 (H)). A cultivar Exceler acumulou mais S na parte aérea do segundo experimento quando a dose de $2,14 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si foi aplicada, e a cultivar AG8060 diminuiu linearmente o acúmulo de S com o aumento da dose aplicada de Si (Figura 15 (H)), podendo ser consequência do menor tempo em contato com Si em solução sentindo os efeitos negativo da solução com alumínio tóxico.

6.9.7 Boro

O teor de B na raiz nos dois experimentos apresentou diferença entre as cultivares. No primeiro experimento a cultivar Exceler obteve um maior teor de B quando comparada com a cultivar AG8060, e no segundo experimento foi a cultivar AG8060 que obteve maior teor de B (Tabela 10). Essa diferença encontrada nos dois experimentos pode ser do diferente período que as cultivares ficaram em contato com Si em solução. Não foi encontrado diferença no acúmulo de B na raiz entre as cultivares no primeiro experimento (Tabela 10), mas, foi encontrado diferença significativa no segundo experimento. A cultivar

AG8060 obteve maior acúmulo quando comparada com a cultivar Exceler (Tabela 10). No primeiro experimento o acúmulo de B na raiz foi parecido entre as duas cultivares não obtendo diferença significativa e como no segundo experimento a diferença foi maior provavelmente seja consequência do menor tempo em contato com Si em solução evitando, dessa forma, que a cultivar sensível ao Al^{3+} conseguisse aumentar sua resistência e acumular mais Si (Tabela 10).

O teor de B na parte aérea nos dois experimentos não apresentou diferença entre as cultivares (Tabela 11), e a diferença em tempo de contato em solução contendo Si não afetou o comportamento das cultivares nos dois experimentos avaliados. Mas, o acúmulo de B na parte aérea nos dois experimentos apresentou diferença. A cultivar Exceler nesses dois experimentos, adquiriu um maior acúmulo de B quando comparada com a cultivar AG8060, sendo portanto, mais eficiente em acumular esse elemento, mesmo em contato com alumínio tóxico em solução (Tabela 11). O tempo em contato com Si em solução, diferente nos dois experimentos, não modificou o comportamento das cultivares.

Os tratamentos influenciaram significativamente o teor de B na raiz da cultivar Exceler no primeiro experimento (Figura 16(A)), e o teor de B na raiz da cultivar AG8060 nos dois experimentos (Figura 16 (A) e (B)), mas, não influenciaram o teor de B da cultivar Exceler no segundo experimento (Figura 16 (B)). A cultivar Exceler no primeiro experimento reduziu linearmente o teor de B na raiz com o aumento da dose de Si (Figura 11 (A)), não concordando com a hipótese levantada, já que no tratamento que o Si não foi adicionado em solução, a cultivar obteve o maior teor de B na raiz. E nos dois experimentos a cultivar AG8060 aumentou o teor de B com o aumento da dose de Si (Figura 16 (A) e (B)), concordando com a hipótese levantada. O aumento da dose de Si aumentou consequentemente o teor de B na raiz da cultivar tolerante impedindo que os efeitos deletérios do alumínio tóxico presente em solução agissem contra a cultivar diminuindo a absorção de B. Como o comportamento da cultivar AG8060 no primeiro experimento foi similar com o comportamento da mesma cultivar no segundo experimento, o diferente período de contato com Si em solução que tiveram durante os experimentos não foi relevante.

O acúmulo de B na raiz da cultivar Exceler no primeiro experimento reduziu significativamente com o aumento da dose de Si não concordando com a hipótese

levantada, e o acúmulo de B da cultivar AG8060 não modificou significativamente com os tratamentos aplicados (Figura 16 (C)). No segundo experimento a cultivar Exceler não modificou o acúmulo de B na raiz, mas, aumentou o acúmulo de B na raiz da cultivar AG8060 com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 16 (D)), neste caso, concordando com a hipótese levantada. A falta de resposta da cultivar Exceler no segundo tratamento pode estar relacionada com o menor tempo que a cultivar ficou em contato com Si em solução não sendo suficiente para mostrar mudanças com as doses de Si aplicadas.

Os tratamentos influenciaram o teor de B na parte aérea da cultivar Exceler no primeiro experimento obtendo o maior teor quando a dose de $1,98 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si foi aplicada (Figura 16 (E)), encontrando a dose ideal de Si favorecendo a absorção de B na parte aérea. Os tratamentos não influenciaram o teor de B na parte aérea da cultivar AG8060 no primeiro experimento (Figura 16 (E)), e o teor de B das duas cultivares no segundo experimento (Figura 16 (E) e (F)).

Provavelmente, o teor de B na parte aérea da cultivar Exceler no segundo experimento apresentou um comportamento diferente do primeiro experimento devido ao menor tempo que ficou em contato com Si em solução não sendo suficiente para obter resposta, já que o tempo de permanência em solução contendo alumínio tóxico foi o mesmo para os dois experimentos.

As doses de Si não influenciaram o acúmulo de B na parte aérea da cultivar Exceler no primeiro experimento (Figura 16 (G)), e o acúmulo de B das duas cultivares no segundo experimento (Figura 16 (H)). Influenciando apenas o acúmulo de B da cultivar AG8060 onde o maior acúmulo foi encontrado quando a dose de $1,81 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si foi aplicado (Figura 16 (G)), encontrando uma dose adequada para a cultivar em condições adversas, nesse caso, contendo alumínio tóxico em solução. Provavelmente, o acúmulo de B na parte aérea da cultivar Exceler no segundo experimento apresentou um comportamento diferente do primeiro experimento devido ao menor tempo que ficou em contato com Si em solução não sendo suficiente para mostrar uma resposta significativa.

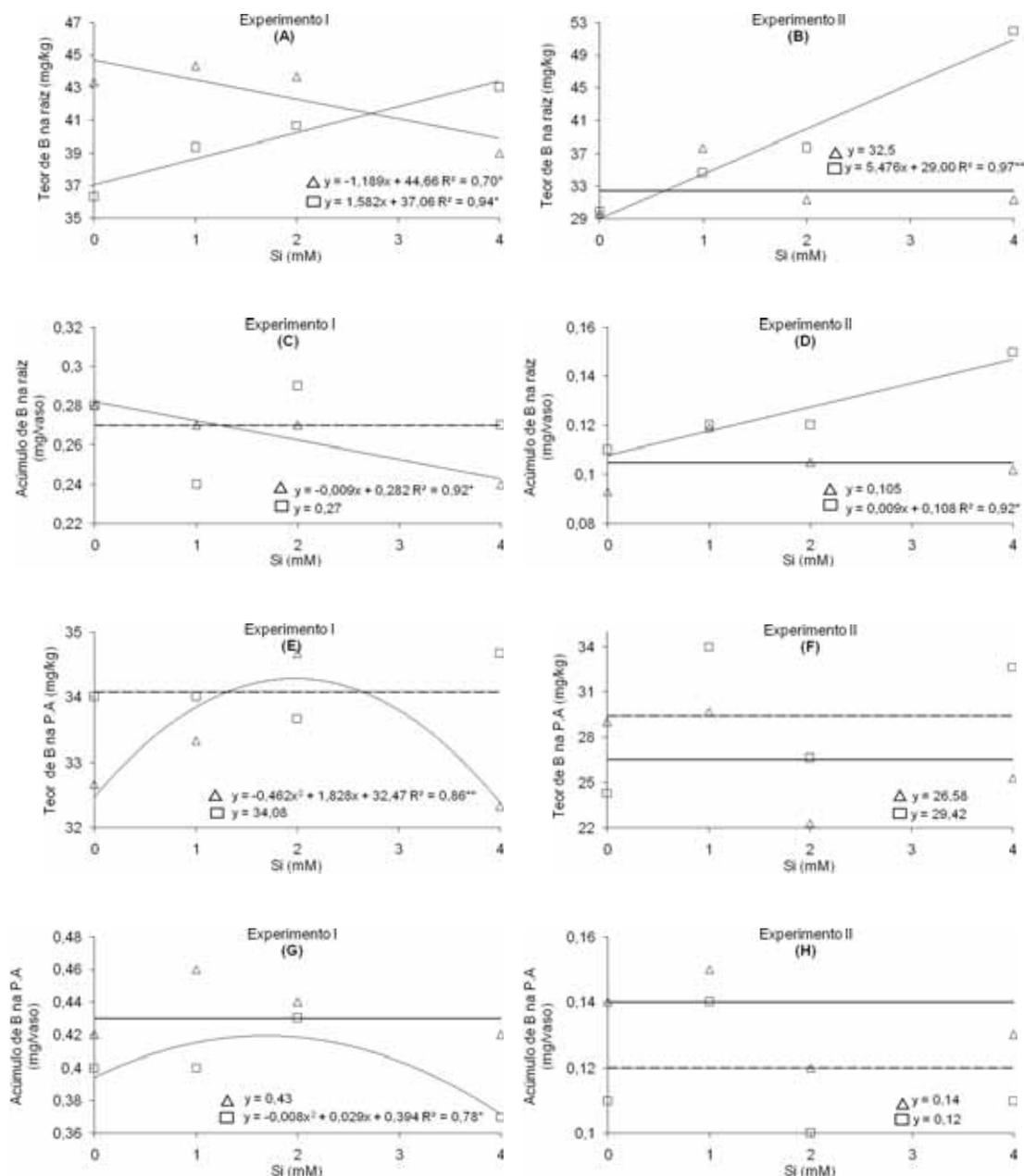


Figura 16. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de boro, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de boro, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho (Δ) Excelsa (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

6.9.8 Cobre

O teor de Cu na raiz do primeiro experimento apresentou diferença significativa entre as cultivares. A cultivar Exceler adquiriu um maior teor de Cu quando comparada com a cultivar AG8060 (Tabela 10), sendo mais eficiente em absorver Cu. O teor de Cu na raiz do segundo experimento e o acúmulo de Cu na raiz do primeiro e segundo experimento não apresentou diferença significativa (Tabela 10). Essa diferença encontrada nos dois experimentos pode ter ocorrido devido o diferente período que as cultivares ficaram em contato com Si em solução.

O teor de Cu na parte aérea nos dois experimentos e o acúmulo de Cu na parte aérea no primeiro experimento apresentou diferença significativa entre as cultivares mostrando que, nesses casos, a cultivar AG8060, obteve um maior teor e acúmulo de Cu quando comparada com a cultivar Exceler (Tabela 11), como foi observado, a cultivar AG8060 na parte aérea é mais eficiente em absorver e acumular Cu em meio contendo alumínio tóxico quando comparada com a cultivar Exceler. Não foi verificada diferença significativa no acúmulo de Cu na parte aérea do segundo experimento (Tabela 11). Essa diferença encontrada, nos dois experimentos, para o acúmulo de Cu na parte aérea pode ser consequência do diferente período que as cultivares ficaram em contato com Si em solução.

O teor de Cu na raiz, da cultivar Exceler, aumentou com o aumento da dose de Si no primeiro experimento (Figura 17 (A)), concordando com a hipótese levantada, mostrando um favorecimento do silício em solução, na absorção do Cu mesmo em solução contendo Si, mas, a cultivar Exceler não modificou no segundo experimento (Figura 17 (B)). Essa falta de resposta da cultivar Exceler no segundo experimento pode estar relacionada com o tempo mais curto que ficou em contato com Si em solução. A cultivar AG8060, nos dois experimentos, modificou com os tratamentos aplicados e no primeiro experimento, obteve o menor teor de Cu na raiz na dose de $2,3 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si (Figura 17 (A)). Já, no segundo experimento, houve uma queda na dose de $1,31 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si, voltando a aumentar nas maiores doses (Figura 12 (B)). O comportamento da cultivar AG8060 no segundo experimento foi parecido com o comportamento da mesma cultivar no primeiro experimento, essa pequena modificação pode estar relacionada com o tempo em exposição no silício em solução.

As doses de Si influenciaram o acúmulo de Cu na raiz das duas cultivares no primeiro experimento. A cultivar Exceler aumentou linearmente o acúmulo de Cu na raiz com o aumento da dose de Si concordando com a hipótese levantada e a cultivar AG8060 diminuiu linearmente o acúmulo de Cu com o aumento da dose de Si aplicada em solução (Figura 17 (C)). As duas cultivares no segundo experimento não modificaram significativamente o acúmulo de Cu na raiz (Figura 17 (D)). Essa diferença encontrada, nos dois experimentos pode ser devido ao diferente período que as cultivares ficaram em contato com Si em solução não sendo suficiente para apresentar resposta.

As cultivares no primeiro experimento modificaram o teor de Cu na parte aérea, gerando queda linear no teor de Cu da cultivar Exceler com o aumento da dose de Si e aumento linear da cultivar AG8060 com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 17 (E)). O resultado obtido pela cultivar AG8060 está de acordo com a hipótese levantada, sendo que, o aumento das doses de Si foi capaz de impedir o efeito deletério do alumínio tóxico, beneficiando a cultivar. Medeiros et al. (2009), obtiveram decréscimo no teor de Cu, nas folhas de cana planta, a cada tonelada de escória aplicada no solo.

Os tratamentos não influenciaram o teor de Cu na parte aérea das duas cultivares no segundo experimento (Figura 17 (F)). Essa diferença encontrada nos dois experimentos pode estar relacionada com o diferente período que as cultivares ficaram em contato com silício em solução.

As cultivares no primeiro experimento e a cultivar AG8060 no segundo experimento modificaram o acúmulo de Cu na parte aérea (Figura 17 (G) e (H)). A cultivar Exceler no primeiro experimento reduziu o acúmulo de Cu na parte aérea com o aumento da dose de silício (Figura 17 (G)), e a cultivar AG8060 no primeiro experimento aumentou o acúmulo de Cu (Figura 17 (G)), mas, no segundo experimento reduziu o acúmulo com o aumento da dose de Si (Figura 17 (H)). Essa diferença encontrada, nos dois experimentos da cultivar AG8060, provavelmente, seja consequência do menor tempo em contato com silício em solução.

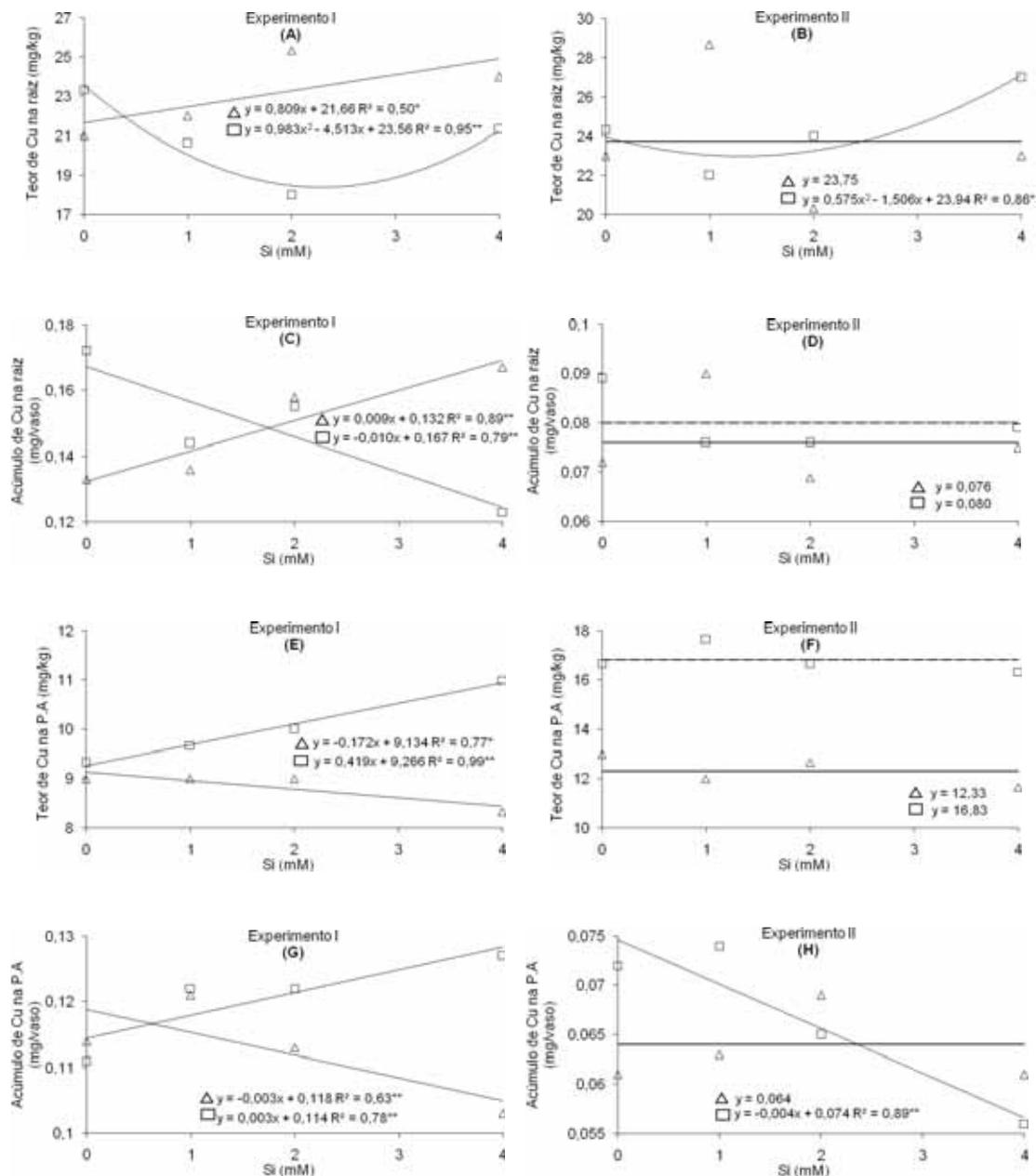


Figura 17. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de cobre, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de cobre, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

6.9.9. Ferro

O teor de Fe na raiz dos dois experimentos apresentou diferença entre as duas cultivares (Tabela 10). A cultivar Exceler apresentou maior teor de Fe quando comparado com a cultivar AG8060. Não foi observado diferença entre as duas cultivares no acúmulo de Fe na raiz nos dois experimentos (Tabela 10). O tempo diferenciado que as cultivares ficaram em contato com Si em solução não afetou o comportamento delas.

O teor de Fe na parte aérea no primeiro experimento modificou significativamente entre as duas cultivares, mas, não modificou no segundo experimento. A cultivar AG8060, obteve maior teor de Fe na parte aérea quando comparado com a cultivar Exceler (Tabela 11). A falta de resposta no segundo experimento pode ter ocorrido em consequência do menor tempo que as cultivares ficaram em contato com silício em solução (Tabela 11). O acúmulo de Fe na parte aérea modificou significativamente entre as duas cultivares nos dois experimentos, sendo que, a cultivar Exceler acumulou mais ferro quando comparada com a cultivar AG8060. Essa resposta parecida observada no acúmulo de Fe na parte aérea das cultivares nos dois experimentos demonstra que o tempo diferenciado em solução contendo silício não interferiu no comportamento delas.

Os tratamentos não influenciaram o teor de Fe na raiz da cultivar AG8060 no primeiro experimento (Figura 18 (A)) e o teor de Fe das duas cultivares no segundo experimento (Figura 18 (B)), influenciando apenas, a cultivar Exceler no primeiro experimento. A cultivar Exceler obteve crescimento no teor de Fe até a dose de $2,8 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si (Figura 18 (A)). No primeiro experimento, a melhor dose pode ser definida, trazendo benefícios para a planta, impedindo consequentemente a ação deletéria do alumínio tóxico.

O resultado diferente obtido no segundo experimento, da cultivar Exceler, provavelmente seja devido ao menor tempo que ficou em contato com silício em solução, não conseguindo obter a mesma resposta.

O acúmulo de Fe na raiz não modificou com os tratamentos no primeiro experimento para a cultivar AG8060 (Figura 18 (C)), e no segundo experimento para a cultivar Exceler (Figura 18 (D)). No primeiro experimento a cultivar Exceler aumentou o acúmulo de Fe na raiz até a dose de $2,43 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si, onde alcançou o ponto máximo (Figura 13 (C)).

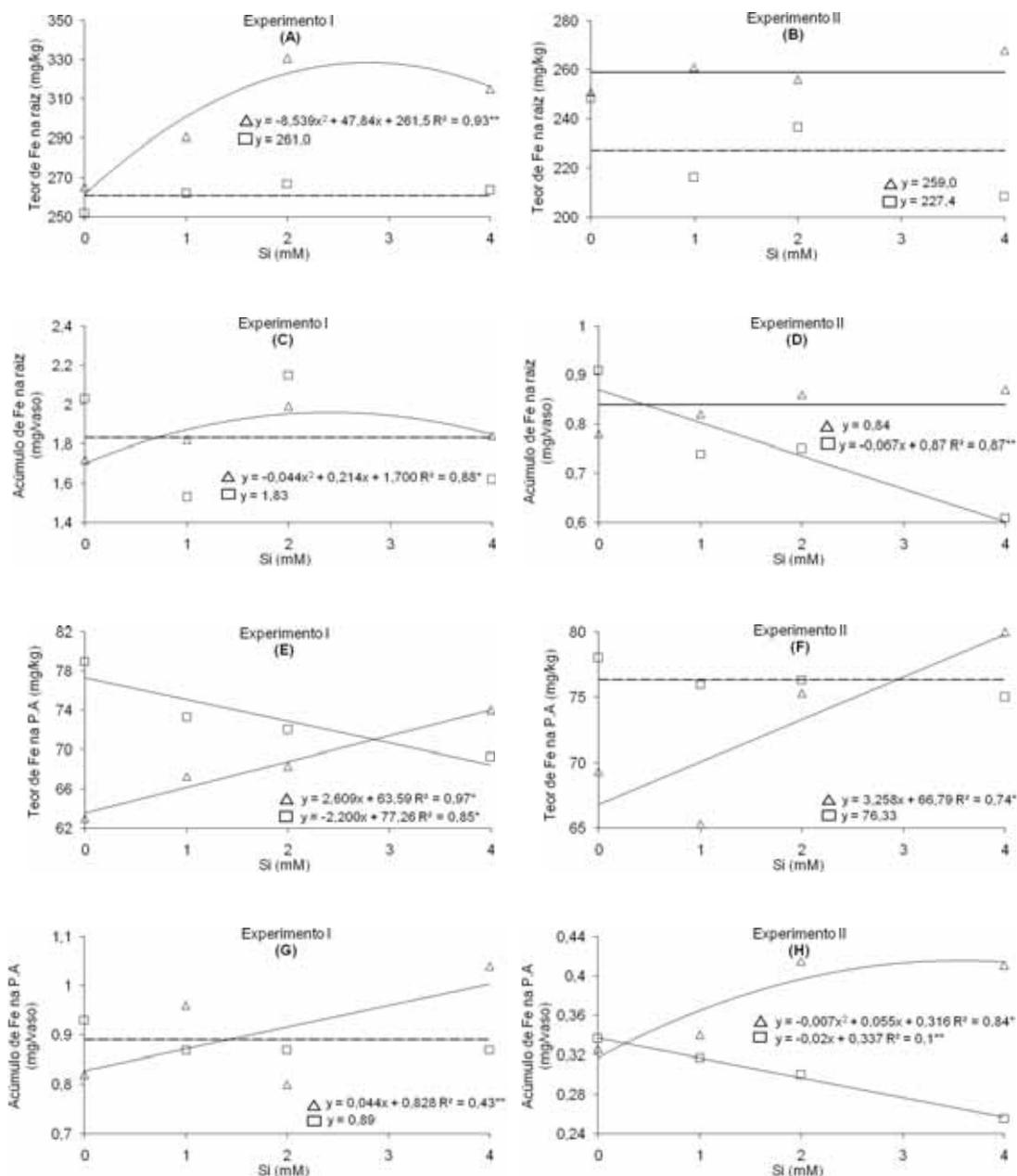


Figura 18. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de ferro, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de ferro, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (□) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

E no segundo experimento a cultivar AG8060 diminuiu o acúmulo de Fe com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 18 (D)), não concordando com a hipótese levantada. Esse comportamento da cultivar AG8060, no segundo experimento, pode ter ocorrido devido o menor tempo que ficou em contato com Si em solução, mas, permaneceu o mesmo tempo em contato com Al tóxico.

O teor e acúmulo de Fe na parte aérea da cultivar Exceler nos dois experimentos aumentou com o aumento da dose de Si aplicada concordando com a hipótese levantada (Figura 18 (E), (F), (G) e (H)). Já a cultivar AG8060, diminuiu o teor de ferro na parte aérea, do primeiro experimento com o aumento das doses de silício aplicada e não apresentou diferença significativa no segundo experimento (Figura 18 (E) e (F)). A mesma cultivar não apresentou diferença significativa no acúmulo de Fe com as doses aplicadas de Si no primeiro experimento, mas, apresentou no segundo experimento (Figura 18 (G) e (H)), gerando queda linear do acúmulo de Fe com o aumento da dose de Si adicionada. Medeiros et al. (2009), obtiveram decréscimo nos teores de Fe nas folhas de cana planta, a cada tonelada de escória aplicado no solo. Sobral et al. (2011) aplicando escória (198 g kg^{-1} de SiO_2 total) não observaram incrementos de Fe na parte aérea da cana-de-açúcar.

6.9.10 Manganês

O teor de Mn na raiz nos dois experimentos e o acúmulo de Mn na raiz no segundo experimento apresentaram diferença entre as duas cultivares. O teor e acúmulo de Mn foram maiores na cultivar exceler quando comparados com a cultivar AG8060 (Tabela 10), resultando em uma cultivar mais eficiente em absorver e acumular Mn, mesmo em condições inadequadas do meio, quando comparada com a cultivar AG8060. No primeiro experimento o acúmulo de Mn na raiz não apresentou diferença entre as cultivares (Tabela 10). Essa diferença na resposta obtida de um experimento para o outro pode ter ocorrido devido ao diferente período que as cultivares ficaram em contato com Si em solução.

O teor e acúmulo de Mn na parte aérea nos dois experimentos apresentaram diferença significativa entre as duas cultivares. A cultivar AG8060 obteve um maior teor nos dois experimentos e um maior acúmulo no primeiro experimento de Mn quando comparada com a cultivar Exceler (Tabela 11). Neste caso, a cultivar tolerante foi mais eficiente em absorver e acumular Mn na parte aérea.

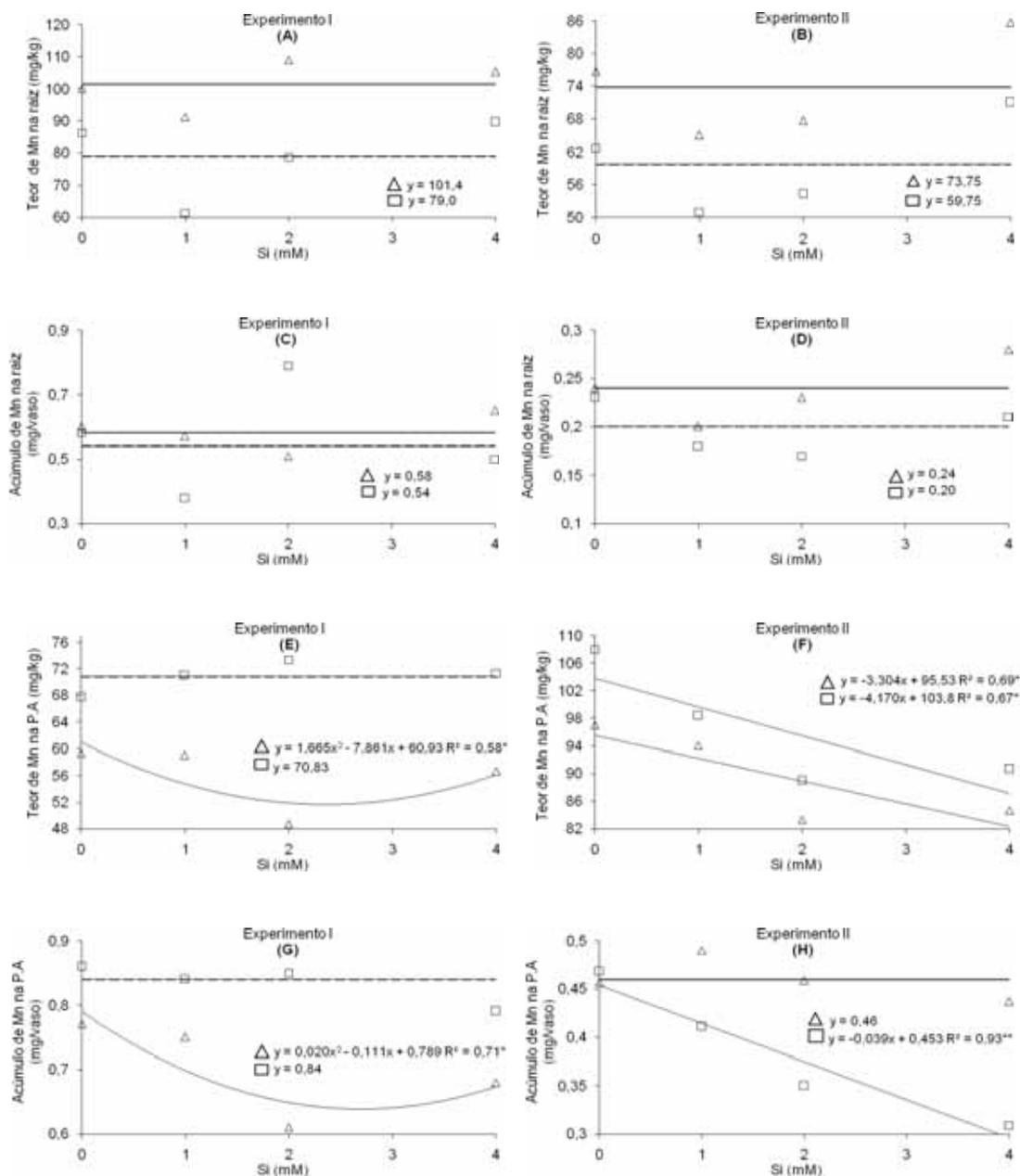


Figura 19. Teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de manganês, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de manganês, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho (Δ) Excelsa (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício em solução) e Experimento II (9 dias com silício em solução).

Apenas, no segundo experimento o acúmulo de Mn na parte aérea foi maior na cultivar exceler (Tabela 11). Essa diferença observada no comportamento das cultivares no segundo experimento em relação ao primeiro, no acúmulo de Mn na parte aérea pode ser devido ao menor tempo que ficaram em contato com Si em solução não tendo tempo suficiente para mostrar a mesma resposta.

Os tratamentos não modificaram, significativamente, o teor (Figura 19 (A) e (B)) e o acúmulo (Figura 19 (C) e (D)) de Mn na raiz das duas cultivares nos dois experimentos realizados. Nesses parâmetros avaliados o tempo diferenciado que as cultivares ficaram em contato com solução contendo Si não interferiu no comportamento delas.

O teor e acúmulo de Mn na parte aérea da cultivar Exceler no primeiro experimento modificou com os tratamentos adicionados gerando queda no teor e acúmulo de Mn com o aumento da dose de Si aplicada em solução, sendo que, o menor teor e acúmulo desse nutriente foi encontrado quando as doses de $2,36 \text{ mmol L}^{-1}$ e $2,78 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si, respectivamente, foram aplicadas (Figura 19 (E) e (G)). A cultivar AG8060 não apresentou diferença significativa no teor e acúmulo de Mn com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 19 (E) e (G)).

Já, no segundo experimento, a cultivar Exceler reduziu seu teor de Mn na parte aérea com o aumento da dose de Si, mas não apresentou diferença no acúmulo de Mn (Figura 19 (F) e (H)). A cultivar AG8060 reduziu linearmente o teor e o acúmulo de Mn na parte aérea do segundo experimento com o aumento da dose de Si (Figura 19 (F) e (H)). A queda no teor e acúmulo de Mn observada nas cultivares não correlaciona com a hipótese levantada, já que as doses de Si não beneficiaram as cultivares ao ponto de aumentar a absorção e o acúmulo de Mn na presença do Al^{3+} . Sobral et al. (2011) aplicando escória (198 g kg^{-1} de SiO_2 total) não observaram incrementos de Mn na parte aérea da cana-de-açúcar.

6.9.11. Zinco

O teor e acúmulo de Zn na raiz (Tabela 10) e o teor de Zn na parte aérea (Tabela 11) dos dois experimentos apresentaram diferença significativa entre as duas cultivares. O maior teor e acúmulo de Zn foi encontrado na cultivar AG8060 quando comparado com a cultivar Exceler. A cultivar tolerante mais eficiente em absorver e acumular Zn na raiz. Nesses parâmetros avaliados o diferente período que as cultivares ficaram em

contato com Si em solução nos dois experimentos não interferiu no comportamento delas (Tabela 10).

O acúmulo de Zn na parte aérea do primeiro experimento apresentou diferença significativa entre as cultivares (Tabela 11). A cultivar AG8060 apresentou maior acúmulo de Zn na parte aérea quando comparada com a cultivar Exceler. Não foi verificada diferença significativa entre as cultivares no acúmulo de Zn na parte aérea no segundo experimento (Tabela 11). Provavelmente, não foi verificada diferença entre as cultivares no segundo experimento devido ao menor tempo de exposição que as cultivares ficaram em solução contendo silício.

Os tratamentos não influenciaram o teor de Zn na raiz da cultivar Exceler nos dois experimentos (Figura 20 (A)) e (B)), mas, influenciaram o teor de Zn da cultivar AG8060 nos dois experimentos, resultando em um comportamento parecido com o aumento da dose de Si, reduzindo o teor Zn até a dose de $2,35 \text{ mmol L}^{-1}$ (primeiro experimento) e $1,78 \text{ mmol L}^{-1}$ (segundo experimento) ser aplicada, aumentando posteriormente com o aumento da dose de Si adicionada.

A cultivar Exceler aumentou e a cultivar AG8060 diminuiu linearmente o acúmulo de Zn na raiz no primeiro experimento com o aumento da dose de Si (Figura 20 (C)). Os tratamentos não influenciaram significativamente o acúmulo de Zn na raiz da cultivar Exceler no segundo experimento, mas, influenciaram o acúmulo de Zn da cultivar AG8060 obtendo o menor acúmulo quando a dose de $2,36 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si foi aplicada (Figura 20 (D)), aumentando posteriormente com o aumento da dose de Si adicionada em solução. Os resultados diferentes obtidos, nos dois experimentos, provavelmente seja em consequência do menor tempo que as cultivares do segundo experimento ficaram em solução contendo silício.

As doses de Si não influenciaram significativamente o teor de Zn na parte aérea das duas cultivares no primeiro experimento (Figura 20 (E)), e também o teor de Zn da cultivar AG8060 no segundo experimento (Figura 20 (F)). Apenas o teor de Zn na parte aérea da cultivar Exceler no segundo experimento modificou significativamente com os tratamentos e o teor de Zn, dessa cultivar, reduziu com o aumento da dose de Si aplicada (Figura 20 (F)), não concordando com a hipótese levantada.

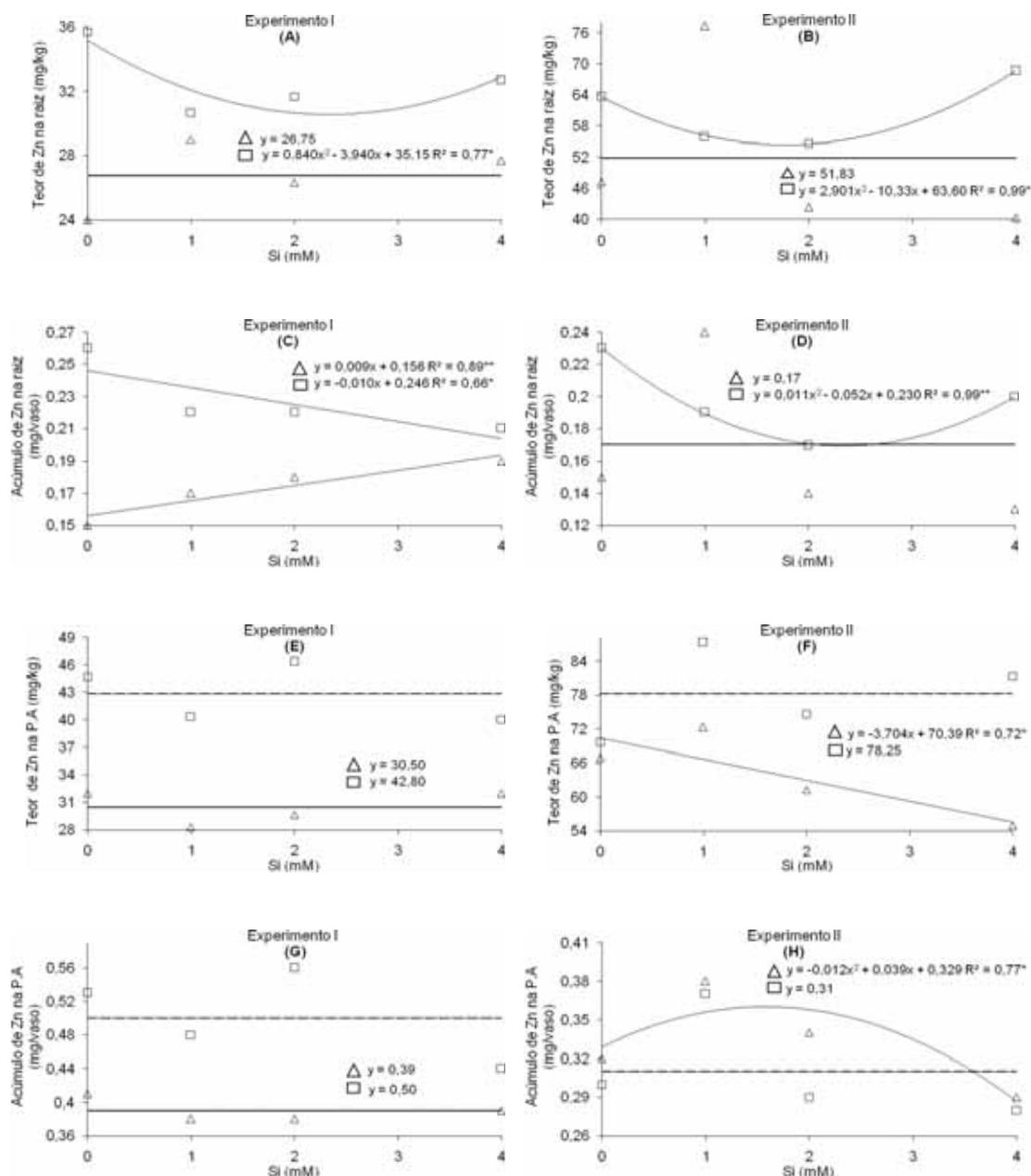


Figura 20. Médias dos teores ((A) e (B)) e acúmulo ((C) e (D)) de zinco, na raiz, no primeiro e no segundo experimento, e teores ((E) e (F)) e acúmulo ((G) e (H)) de zinco, na parte aérea, no primeiro e segundo experimento, em função da aplicação de silício nas duas cultivares de milho, (Δ) Exceler (sensível ao Al^{3+}) e (\square) AG8060 (tolerante ao Al^{3+}) com posterior aplicação de alumínio. Experimento I (18 dias com silício) e Experimento II (9 dias com silício).

Provavelmente, essa redução no teor de Zn na parte aérea do segundo experimento seja devido ao menor tempo que a cultivar ficou em contato com Si. Já, Sobral et al. (2011), aplicando escória (198 g.kg^{-1} de SiO_2 Total), em cana, observaram um aumento significativo no teor de Zn na parte aérea.

As cultivares do primeiro experimento e a cultivar AG8060 do segundo experimento não modificaram significativamente o acúmulo de Zn na parte aérea com os tratamentos aplicados (Figura 20 (G) e (H)). A cultivar Exceler no segundo experimento obteve o maior acúmulo de Zn quando a dose de $1,63 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si foi adicionada em solução, diminuindo o acúmulo quando maiores doses de Si foram aplicadas (Figura 20 (H)).

7 CONCLUSÕES

A cultivar Exceler em contato com Al^{3+} em solução apresentou menor desenvolvimento radicular quando comparada com a cultivar AG8060 mesmo sob influência do Si;

A maior massa fresca e seca na raiz foi encontrada na cultivar AG8060 e a maior massa fresca e seca na parte aérea foi encontrada na cultivar Exceler (sensível ao Al^{3+}) mesmo modificando o tempo de exposição das raízes dos cultivares em solução nutritiva com a presença do Si.

O teor e acúmulo de Si na raiz foram maiores na cultivar Exceler mostrando ser mais eficiente na absorção desse elemento.

Quando as plantas ficaram maior tempo em contato com Si em solução no primeiro experimento, o acúmulo de fenóis nas cultivares foi quase o dobro do acúmulo obtido pelas cultivares no segundo experimento, provavelmente essa diferença no acúmulo ocorreu devido ao maior tempo que as plantas ficaram em contato com o Si no primeiro experimento. E a presença do Si em solução, além de impedir a ação deletéria do Al^{3+} aumentou a produção de fenóis com o aumento da dose aplicada obtendo a dose ideal.

A cultivar Exceler adquiriu maior teor na raiz de S, B, Cu, Fe e Mn no primeiro experimento e a cultivar AG8060 adquiriu maior teor e acúmulo na raiz e maior teor na parte aérea de N, P, K, Ca, Mg e Zn nos dois experimentos mostrando ser cultivares mais eficiente em absorver e acumular determinado elemento.

8 REFERÊNCIAS

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

AGARIE, S. et al. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). **Plant Production Science**, Tokyo, v. 1, p. 89-95, 1998.

BALANDRIN, M. F. et al. Natural plants chemicals: sources of industrial and medicinal materials. **Science**, Washington DC, v. 228, p. 1154-1160, 1985.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 75-92, 2002.

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.

BERTAN, I. et al. Variabilidade genética em trigo aferida por meio da distância genealógica e morfológica. **Scientia Agraria**, Curitiba, PR, v. 8, n. 1, p. 67-74, 2007.

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

- BORGONOVİ, R. A. et al. Aluminum tolerance in sorghum. In: GABELMAN, H. W.; LOUGNMAN, B. C. **Genetics aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1987. p. 213-221.
- BRITEZ, R. M. et al. The relationship between aluminium and silicon accumulation in leaves of *Faramea marginata* (Rubiaceae). **New Phytologist**, Lancaster, v. 156, p. 437-444, 2002.
- 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, n. 8, p. 575-579, 1996.
- BRUNETON, J. **Elementos de fitoquímica y de farmacognosia**. Zaragoza: Acribia S.A., 1991. 594 p.
- CAKMAK, I.; HORST, J. H. Effects of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 83, p. 463-468, 1991.
- 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, SP, v. 55, p. 227-232, 1998.
- CARVALHO, J. R. P. et al. Resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo em solos dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 19, p. 61-67, 2003.
- 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. 119f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.
- 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.
- COSTA, C. N. et al. Efeitos do alumínio na morfologia de raízes e na cinética de absorção de potássio em milho. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, RS, v. 6, n. 3, p. 251-253, 2000.
- DAWRA, R. K.; MAKKAR, H. P. S.; SINGH, B. Protein-binding capacity of microquantities of tannins. **Analytical Biochemistry**, New York, v. 170, p. 50-53. 1988.
- DELHAIZE, E.; RYAN, P. Update on environmental stress: aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 107, n. 2, p. 315-321, 1995.

DEREN, C.W. et al. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. **Crop Science**, New York, v. 34, p. 733-37, 1994.

DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on Everglades Histosols. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, p. 2273-2280, 1993.

DRUMMOND, A.; FORSBERG, R.; RODRIGO, A. G. The inference of stepwise changes in substitution rates using serial sequence samples. **Molecular Biological Evolucion**, Dublin, v. 18, p. 1365–1371, 2001.

DUAN, J.; GREGORY, J. The influence of silicic acid on aluminium hydroxide precipitation and flocculation by aluminium salts. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 69, p.193-201, 1998.

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.

FANCELLI, A. L. Milho, estresses abióticos e bióticos afetam desempenho e produtividade. **Correio – Revista da Bayer CropScience para a Agricultura Moderna**, São Paulo, v. 1, p. 12-15, 2007.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 2. ed. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360 p.

FERREIRA, R. de P.; SALGADO, L. T.; JORGE, H. D. Tolerância de cultivares de arroz ao alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, n. 12, p. 1257-1260, 1986.

FOY, C. D. Soil chemical factors limiting plant root growth. In: HATFIELD, J. L.; STEWART, B. A. **Limitations to plant root growth**. New York: Springer-Verlag, 1992. p. 97-149.

FREITAS, L. B. de. **Silício na tolerância ao alumínio por plantas de arroz**. 2011. 100p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

FREITAS, L. B de. **Adubação foliar com silício na cultura do milho**. 2008. 41 p. Monografia (Agronomia) - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Cassilândia, 2008.

- FREITAS, F. A. et al. 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, RS, v. 36, n. 1, p. 72-79, 2006.
- FRY, S. C.; MILLER, J. G. Toward a working model of the growing plant cell-wall: Phenolic cross-linking reactions in the primary cell-walls of dicotyledons. In: LEWIS, N. G. I; PAICE, M.G. (Ed.). **Plant cell-wall polymers: biogenesis and biodegradation**. Washington, D. C: American Chemical Society, 1989. p. 33-46.
- FURLANI, P. R.; DUARTE, A. P.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Tolerância ao alumínio em cultivares de milho. In: DUARTE, A. P.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. (Coord.). **Fatores bióticos e abióticos em cultivares de milho e estratificação ambiental: avaliação AC/CATI/Empresas – 1999-2000**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000. p. 19-29. (Boletim Científico, 5).
- FURLANI, A. M. C.; FURLANI, P. R. Composição e pH de soluções nutritivas para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas. **Boletim Técnico IAC**, Campinas, SP, v. 121, p. 1-34, 1988.
- FURLANI, P. R.; HANNA, L. G. Avaliação da tolerância de plantas de sorgo e milho ao alumínio em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, n. 8, p. 205-8, 1984.
- GIONGO, V.; BOHNEN, H. Relação entre alumínio e silício em genótipos de milho resistente e sensível a toxidez de alumínio, **Bioscience Journal**, Uberlândia, MG, v. 27, n. 3, p. 348-356, 2011.
- GOTO, M. et al. O. Protective effect of silicon on phenolic biosynthesis and ultraviolet spectral stress in rice crop. **Plant Science**, Inglaterra, v. 164, p. 349-356, 2003.
- GUNES, A. et al. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 13/14, p. 1885-1903, 2008.
- HARRIS, P. J.; HARTLEY, R. D. Detection of bound ferulic acid in the cell walls of the Gramineae by ultraviolet fluorescence microscopy. **Nature**, London, v. 259, p. 508-510, 1976.
- 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.
- HORST, W. J. The role of the apoplast in aluminium toxicity and resistance of higher plants: a review. **Z. Pflanzenernahr Bodenkd**, Weinheim, v. 158, p. 419-428, 1995.

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.

INANAGA, S.; OKASAKA, A. Calcium and silicon binding compounds in cell walls of rice shoots. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 41, n. 1, p. 103-110, 1995.

INANAGA, S.; OKASAKA, A.; TANAKA, S. Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant ? **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 41, n. 1, p. 111-117, 1995.

JONES, D. L.; KOCHIAN, L. V.; GILROY, S. Aluminum induces a decrease in cytosolic calcium concentration in BY-tobacco cell cultures. **Plant Physiology**, Washington DC, v. 116, n. 1, p. 81-89, 1998.

JUSTINO, G. C. et al. A. Absorção e redução de nitrato em duas cultivares de arroz na presença de alumínio, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 8, p. 1285-1290, 2006.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. London: Boca Raton: CRC, 2000. 413p.

KAMENIDOU, S.; CAVINS, T. J.; MAREK, S. Evaluation of silicon as a nutritional supplement for greenhouse zinnia production. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 119, p. 297-301, 2009.

KIDD, P. S. L. 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**, Oxford, 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. (Coord.). **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. 4, p. 237-260, 1995.

KOLESNIKOV, M. P.; GINS, V. K. Forms of Silicon in Medicinal Plants. **Applied Biochemistry and Microbiology**, New York, v. 37, n. 5, p. 524-527, 2001.

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

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. 3. ed. Uberlândia: UFU/ICIAG, 2004. (Boletim Técnico, 1).

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2002. 23 p. (Boletim Técnico, 1).

LARSEN, P. B. et al. Aluminum-resistant *Arabidopsis* mutants that exhibit altered patterns of aluminum accumulation and organic acid release from roots. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 117, p. 9-17, 1998.

LAZOF, D. B. et al. Rapid uptake of aluminum into cells of intact soybean root tips. A microanalytical study using secondary ion mass spectroscopy. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 106, n. 3, p. 1107-1114, 1994.

LIANG, Y. et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, Barking, v. 147, p. 422-428, 2007.

LIMA FILHO, O. F. de; TSAI, S. M. Crescimento e produção do trigo e da aveia branca suplementados com silício. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Embrapa Agropecuária Oeste**, Dourados, MS, n. 41, 2007. 34 p.

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

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

MA, J. F. Role of organic acids in detoxification of aluminum in higher plants. **Plant and Cell Physiology**, Tokyo, v. 41, p. 383-390, 2000.

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**, Dordrecht, 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.

MAGNAVACA, R. **Genetic variability and the inheritance of aluminum tolerance in maize (*Zea mays* L.)**. Lincoln, University of Nebraska, 1982. 135p. Tese (Ph.D.).

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.

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

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, MG, v. 27, p. 867-873, 2003.

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

MARTINS, D. **Classificação climática – Botucatu (SP)**. Botucatu: UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Departamento de Ciências Ambientais, 2003. Não paginado.

MASCARENHAS, H. A. A.; CAMARGO, C. E. O.; FALIVENE, S. M. P. Efeito do alumínio sobre o crescimento de raízes, peso seco da planta e raízes de diferentes cultivares de soja. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 43, p. 191-200, 1995.

MCAINSH, M. R.; HETHERINGTON, A. M. Encoding specificity in Ca^{2+} signaling systems. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 3, n. 1, p. 32-36, 1998.

MEDEIROS, L. B.; VIEIRA, A. O.; Aquino, B. F.; Beltrão, N. E. de M. Micronutriente na cana-de-açúcar irrigada: Correção do solo com escória siderúrgica. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, SP, v. 6, p. 447-461, 2009.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute, 1987. 687 p.

MENZIES, J. G. et al. Effects of soluble silicon on the parasitic fitness of *Sphaerotheca fuliginea* on *Cucumis sativus*. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 81, n. 1, p. 84-88, 1991.

MIRANDA, G. V. et al. **Guia Técnico para produção de milho**. Viçosa, MG: EPAMIG, 2005. p. 7.

MITANI, N. et al. Characterization of silicon uptake system and isolation of LSI1 gene from Rice root. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, p. 124, 2005.

NANAYAKKARA U. N.; UDDIN, W. ; DATNOFF, L. E. Effects of soil type, source of silicon, and rate of silicon source on development of gray leaf spot of perennial ryegrass turf. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 92, n. 6, p. 870-877, 2008.

NEUMANN, D.; NIEDEN, U. Z. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. **Phytochemistry**, New York, v. 56, p. 685-692, 2001.

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.

OLMOS, I. R.; CAMARGO, M. N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. **Ciência e Cultura**, São Paulo, SP, v. 28, n. 2, p. 171-180, 1976.

PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; FURLANI, R. P. Tolerância à toxicidade de alumínio de linhagens e híbridos de milho em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 61, n. 1, 11-16, 2002.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminum to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 , and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 46, p. 1201-1207, 1982.

PEIXOTO, P. H. P.; PIMENTA, D. E.; CAMBRAIA, J. Alterações morfológicas e acúmulo de compostos fenólicos em plantas de sorgo sob estresse de alumínio. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 66, n. 1, p. 17-25, 2007.

PERRY, C. C.; KEELING-TUCKER, T. Model studies of colloidal silica precipitation using biosilica extracts from *Equisetum telmateia*. **Colloid and Polymer Science**, Darmstadt, v. 281, n. 7, p. 652-664, 2003.

PERRY, C. C.; KEELING-TUCKER, T. J. Crystalline silica prepared at room temperature from aqueous solution in the presence of intrasilica bioextracts. **Chemical Society, Chemical Communications**, London, n. 23, p. 2587-2588, 1998.

PIÑEROS, M. A. et al. The physiology and biophysics of aluminum tolerance mechanism based on root citrate exudation in maize. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 129, n. 3, p. 1194-1206, 2002.

RAPOSEIRAS, R. et al. Teores de fenólicos em raiz de milho sob toxidez de alumínio. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, MG, v. 4, n. 3, p. 374-380, 2005.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews**, Cambridge, v. 58, n. 2, p. 179-207, 1983.

REIS, T. H. P. et al. O silício na nutrição e defesa de plantas. **Boletim Técnico EPAMIG**, Belo Horizonte, MG, v. 82, 2007. 120 p.

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

SANGSTER, A. G.; HODSON, M. J.; TUBB, H. J. Silicon deposition en higher plants. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 85-113.

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.

SASAKI, M.; YAMAMOTO, Y.; MATSUMOTO, H. Lignin deposition by aluminum in wheat (*Triticum aestivum*) roots. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 96, n. 2, p. 193-198, 1996.

SHIBUYA, N. Phenolic acids and their carbohydrate esters in rice endosperm cell walls. **Phytochemistry**, Elmsford, v. 23, p. 2333-2337, 1984.

SILVA, L. M. **Crescimento radicular e nutrição mineral de cultivares de feijão em resposta a calagem**. 2002. 70 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômica, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

SILVA, L. S.; BOHNEN, H. Rendimento e acúmulo de nutrientes pelo arroz (*Oryza sativa*) em solução nutritiva com e sem a adição de silício. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 3, p. 771-777, 2001.

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.

SNOWDEN, K. C.; GARDNER, R. C. Five genes induced of aluminum in wheat (*Triticum aestivum* L.) roots. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 103, p. 855-861, 1993.

SOBRAL, M. F. et al. Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 15, n. 8, p. 867-872, 2011.

SOSULSKI, F.; KRIGIER, K.; HOGGE, L. Free, esterified and insoluble bound phenolic acids. 3. Composition of phenolic acids in cereal and potato flour. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, DC, v. 30, p. 337-340, 1982.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 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.

TAN, K. S. et al. Effect of ferulic and P-coumaric acids on *Oryza* coleoptile growth and the mechanical properties of cells walls. **Journal of Plant Physiology**, New York, v. 140, p. 460-465, 1992.

VASCONCELOS, 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, n. 3, p. 357-363, 2002.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética de absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interações alumínio fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 8, n. 1, p. 91-96, 1984.

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

WALLACE, A. Participation of silicon in cation-anion balance as a possible mechanism for aluminum and iron tolerance in some gramineae. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 15, p. 1345-1351, 1992.

WANG, Y.; STASS, A.; HORST, W. J. Apoplastic binding of aluminum is involved in Silicon-Induced amelioration of aluminum toxicity in Maize. **Plant Physiology Preview**, Washington, DC, v. 136, p. 3762-3770, 2004.

WARING, R. H.; SCHLESINGER, W. H. **Forest ecosystems: concepts and management**. Orlando: Academic Press, 1985. 340 p.

YASSUDA, M. **Comportamento de fosfatos em solos de cerrado**. 1989. 62 p. Dissertação (Mestrado)—Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Role of silicon in rice nutrition. **Soil Plant Food**, Tokyo, v. 5, p. 127-133, 1959.