

RELAÇÃO ENTRE ALUMÍNIO E SILÍCIO EM GENÓTIPOS DE MILHO RESISTENTE E SENSÍVEL A TOXIDEZ DE ALUMÍNIO

RELATION BETWEEN ALUMINUM AND SILICON IN MAIZE GENOTYPES RESISTANT AND SENSITIVE AT ALUMINUM TOXICITY

Vanderlise GIONGO¹; Humberto BOHNEN²

1. Doutora, Pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, Brasil. vanderlise@cpatsa.embrapa.br; 2. Consultor Técnico do Instituto Rio-Grandense do Arroz – IRGA, Cachoeirinha, RS, Brasil.

RESUMO: A fim de obter informações sobre a relação entre alumínio e silício no crescimento de dois genótipos de milho, sendo um tolerante e outro sensível a toxidez de alumínio, foi realizado um estudo em casa de vegetação, na presença e ausência de alumínio e silício em dois genótipos de milho. Os tratamentos utilizados foram uma solução de 2,0 mmol L⁻¹ de cálcio (CaCl₂), na presença e na ausência de alumínio (0,025 mmol L⁻¹ AlCl₃) e de silício (0,14 mmol L⁻¹ a partir de uma solução de SiO₂). O experimento foi conduzido por um período de cinco dias e no final foram avaliados o comprimento de raiz, as concentrações de silício, alumínio e cálcio na parte aérea e nas raízes e o índice mitótico de células meristemáticas das raízes. O silício reduziu o efeito tóxico do alumínio no crescimento radicular dos genótipos de milho independente da sensibilidade ao alumínio.

PALAVRAS-CHAVE: *Zea mays*. Extrato aquoso. Cálcio. Índice mitótico.

INTRODUÇÃO

O silício é o segundo elemento químico mais abundante da crosta terrestre e no solo (EPSTEIN; BLOOM, 2005) depois do oxigênio (SAVANT et al., 1999), variando entre 28 e 32% em massa de todo material do solo (MALAVOLTA, 2006). O silício não é considerado um elemento essencial para as plantas (por que), entretanto pode funcionar como um elemento benéfico, atuando na redução de estresses bióticos e abióticos, incluindo o provocado pela toxidez de alumínio (EPSTEIN, 2001). A maior parte dos solos possui baixo teor de silício disponível para as plantas, principalmente os solos intemperizados, que passaram por um acentuado processo de lixiviação, tornando-se ácidos e com baixa saturação por bases (NANAYAKARA et al., 2008). Porém, estudos demonstram uma forte correlação do silício com a matéria orgânica do solo evidenciando a origem biogênica deste elemento nas camadas superficiais do solo (SACCONI et al., 2008). A origem biogênica do silício nas camadas superficiais se deve ao fato das plantas acumularem silício em suas estruturas, principalmente as gramíneas, podendo formar opalas biogênicas ou outras estruturas amorfas, ou seja, no ciclo solo/planta o silício passa por diversas etapas, dentre as quais há formação de silicofitólitos (ou corpos silicosos) nos tecidos vegetais (LABORIAU; SENDULSKY, 1966). Para solos não perturbados, sob vegetação nativa, foram observadas maiores concentrações de silício na superfície do solo, diminuindo em profundidade,

similar a concentração de matéria orgânica. A relação entre matéria orgânica e teor de silício sugere que em tais solos prevalecem as formas amorfas de silício advindas do processo de decomposição do tecido vegetal que o absorveu anteriormente (SACCONI et al., 2008).

Na litosfera, o silício 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 silício pelas plantas são muito complexos, dependendo não somente das espécies envolvidas, mas também do suprimento (LIANG et al., 2007). Gunes et al. (2008) verificaram aumento de produção de matéria seca da parte aérea e de raízes com o fornecimento de Si em girassol (*Helianthus annuus*), resultado semelhante a Zanão Júnior et al. (2009) para a cultura do arroz (*Oriza sativa*), demonstrando maior acúmulo desse elemento tanto na parte aérea quanto no sistema radicular. Estudos desenvolvidos com plantas de sorgo (*Sorghum bicolor*), por Sonobe et al. (2009) demonstraram que concentrações de 50–mg.L⁻¹ (usar mg L⁻¹, essa é uma unidade do sistema internacional de unidades – foi alterado) de silício, além do acúmulo, o silício foi eficiente em diminuir o estresse hídrico, aumentando a condutância estomática, a taxa fotossintética e de transpiração e o peso seco quando comparadas com plantas que não receberam silício. O alumínio, ao ser liberado dos minerais para a solução de solo, pode causar problemas de fitotoxidez às plantas. A toxidez de

alumínio tem sido identificada como um dos mais importantes fatores limitantes do crescimento e desenvolvimento das plantas em solos ácidos. O sintoma mais visível de toxidez de alumínio às plantas é a redução do crescimento do sistema radicular, causada por mecanismos diferentes, que atuam fora ou no interior das células (DELHAIZE; RYAN, 1995).

O silício influencia também o crescimento das plantas sob condições de toxidez de alumínio devido à formação de complexos na solução do solo e/ou por reduzir a toxidez interna de alumínio (SANGSTER et al., 2001). Na planta, pode ocorrer a formação de compostos aluminossilicatos na parede celular do córtex de raízes, inibindo a absorção de alumínio para o protoplasma, impedindo desta forma a inibição da atividade enzimática. A presença de silício juntamente com o alumínio em solução pode também provocar aumento nas concentrações de ácidos orgânicos no interior de raízes diminuindo a toxidez de alumínio devido à sua complexação interna por ácidos orgânicos (MA, 2000; PIÑEROS et al., 2002).

Na presença de silício, as concentrações de cálcio podem ser alteradas influenciando o processo de divisão celular. O cálcio, além de atuar como componente estrutural, ele também apresenta 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 Bohnen (2001), que obtiveram maior quantidade de cálcio em plantas de arroz não tratadas com silício em relação às tratadas. Wang et al. (2004) em estudo com genótipos de milho constataram a diminuição dos sintomas de toxidez de alumínio em decorrência da interação do silício com o alumínio alterando a relação cálcio/alumínio e reduzindo o efeito do alumínio no processo de divisão celular na região meristemática das raízes. Por esses motivos, os sistemas de manejo de solo e plantas promovam alterações nas concentrações de silício na solução de solo, influenciando positivamente o crescimento e desenvolvimento de plantas expostas a atividades tóxicas de alumínio (SANGSTER et al., 2001).

Por isso, o estudo teve por objetivo avaliar as interações que ocorrem entre alumínio, cálcio e silício no crescimento de dois genótipos de milho, um tolerante e outro sensível à toxidez de alumínio.

MATERIAL E MÉTODOS

O bioensaio foi realizado em casa de vegetação no Departamento de Solos da Faculdade

de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, utilizando dois genótipos de milho (*Zea mays*, L.), Pioneer P21Y e 8POA, selecionados em testes anteriores e classificados como tolerante e sensível à toxidez de alumínio, respectivamente.

As sementes foram colocadas para germinar em papel filtro e quando as raízes das plântulas apresentaram 3,0 cm de comprimento, foram selecionadas quanto à uniformidade de tamanho e transferidas para vasos de polietileno de 7,0 litros, em número de 15 plantas por parcela. Os tratamentos utilizados foram solução de 2,0 mmol L⁻¹ de cálcio (CaCl₂) sem e com alumínio (0,025 mmol L⁻¹) na forma de AlCl₃ e com e sem silício (0,14 mmol L⁻¹), a partir de uma solução de SiO₂, constituindo os tratamentos TSiAl-, TSi, TAL, TSiAl+. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com quatro tratamentos e quatro repetições.

As concentrações de alumínio e cálcio foram determinadas em testes preliminares, para que a concentração de alumínio fosse adequada para identificar os sintomas de toxidez em diferentes genótipos e para que, a concentração de cálcio fosse adequada para não provocar sintomas de deficiência no sistema radicular.

O experimento foi conduzido por um período de cinco dias, com ajuste diário do pH em 4,5 ± 0,3. Para avaliação do efeito dos tratamentos foi mensurado o comprimento das raízes e subtraído do comprimento inicial para obter a variação do tamanho de raízes em função do crescimento das plântulas. Ao final do experimento, amostras do tecido meristemático das raízes foram coletadas e acondicionadas em recipientes contendo PDB (paradiclorobenzeno), para análises citogenéticas. A metodologia utilizada para pré-tratamento, fixação e coloração das raízes de milho foi descrita por Palmer e Heer (1973). As análises mitóticas foram feitas em microscópio Zeiss Axioplan com aumento de 400 e 1000 vezes, onde foram observados três campos aleatórios em cada lâmina com contagem do número de células em divisão. Os resultados foram expressos através do índice mitótico, ou seja, a porcentagem de células em divisão em relação ao número total de células.

A parte aérea e as raízes frescas foram colocadas em tubos de PVC de 25 mm de diâmetro, com uma extremidade contendo filtro nylon de 0,2 µm, em seguida foram congeladas por 24 horas. Após este período as amostras foram descongeladas e centrifugadas, dentro do próprio tubo a 5.000 rpm, por 30 minutos. O volume extraído foi quantificado e neste foi adicionado uma gota de HCl 6 mol L⁻¹ e colocado para centrifugar a 5.000 rpm durante 10

minutos. Em seguida, no sobrenadante foram determinadas as concentrações de alumínio e cálcio por espectrofotometria de absorção atômica e silício pelo método colorimétrico de Wilding e Smeck (1982).

Após a centrifugação e retirada do extrato, o restante do material, tecido vegetal da parte aérea e raízes, foi colocado em estufa a 60 °C por 72 horas, para posterior quantificação das concentrações de silício, alumínio e cálcio nos tecidos. Os teores de alumínio e cálcio foram determinados segundo metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) e de Si por absorção atômica, após a digestão do tecido com uma mistura de HF, HNO₃ e H₂O₂ em recipiente de teflon hermeticamente fechado e uso de microondas DET 100.

Os dados obtidos no estudo foram submetidos a análise de variância e quando significativo as interações foi realizado o desdobramento das variáveis de acordo com Banzatto e Kronka (2006). As médias foram comparadas por meio do teste de Tukey, a 5% de significância utilizando o programa estatístico SANEST.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tratamento TSi não influenciou (P<0,05) o comprimento das raízes em ambos os genótipos de milho quando comparado ao tratamento testemunha (TSiAl-) (Tabela 1). Entretanto, o tratamento TAl

diminuiu (P<0,05) o tamanho de raízes em ambos os genótipos, com uma redução do comprimento de 48% e 25% para os genótipos sensível (8POA) e tolerante (P21Y) ao alumínio, respectivamente. No tratamento TSiAl+, o comprimento de raízes aumentou (P<0,05) em 32% e 13% para os genótipos sensível e tolerante, respectivamente, em relação ao tratamento contendo apenas alumínio. O genótipo tolerante ao alumínio (P21Y) apresentou menor redução do comprimento de raízes no tratamento com alumínio quando comparado ao genótipo sensível (8POA). Esses dados confirmam o que foi obtido para milho por Wang et al. (2004) que evidenciaram a indução da tolerância ao alumínio pelo silício. Segundo Liang et al. (2007) é amplamente aceito que o -silício pode diminuir a toxidez de alumínio. Esse fenômeno também foi observado para outras culturas como cevada (LIANG et al., 2001), trigo (PIÑEROS et al., 2002), e café (RAMÍREZ-BENÍTEZ et al., 2009). Os mecanismos podem envolver a formação de compostos aluminossilicatos na parede celular do córtex de raízes, inibindo a absorção de alumínio para o protoplasma, impedindo desta forma a inibição da atividade enzimática; o aumento nas concentrações de ácidos orgânicos no interior de raízes diminuindo a toxidez de alumínio devido à sua complexação interna por ácidos orgânicos (MA, 2000; PIÑEROS et al., 2002); alterações nas concentrações de cálcio influenciando o processo de divisão celular.

Tabela 1. Comprimento de raízes e índice mitótico de dois genótipos de milho cultivados em soluções contendo 0,014 mmol dm⁻³ de silício (Si) e 0,025 mmol.dm⁻³ de alumínio (Al).

Genótipo	Tratamento			
	Sem Al e Si	Si	Al	Com Al e Si
	Comprimento de raízes			
	----- cm -----			
8POA	24,6 Aa	24,8 Aa	12,9 Bc	20,7 Ab
P21Y	24,8 Aa	27,2 Aa	18,6 Ac	21,8 Ab
	Índice mitótico			
	----- % -----			
8POA	80,0 Aa	78,0 Aa	36,0 Bc	58,0 Ab
P21Y	75,0 Aa	79,0 Aa	62,0 Ab	62,0 Ab

Médias seguidas com letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas distintas na linha diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey (P<0,05).

A presença de silício não alterou (P<0,05) o valor do índice mitótico, entretanto, o tratamento TAl diminuiu o índice para os dois genótipos de milho (44 e 13%, para os genótipos sensível e tolerante, respectivamente) (Tabela 1). A diminuição do efeito tóxico do alumínio pela presença de silício, também é verificada por meio do índice mitótico. No genótipo sensível, o valor do

índice mitótico aumentou 22% no TSiAl+ em relação ao TAl. No genótipo tolerante a presença de silício juntamente com alumínio não alterou o índice mitótico (Tabela 1). Essa inferência na divisão celular causada pela ação do alumínio sobre a morfologia do sistema radicular representa um dos mecanismos da ação fitotóxica deste elemento sobre o desenvolvimento de genótipos sensíveis

(CANÇADO et al., 1999). A literatura indica efeitos controversos na relação alumínio e silício, porém é importante ressaltar a existência da variabilidade genética, onde para a mesma espécie podem ocorrer diferentes respostas à toxidez de alumínio. Isso explica as diferenças encontradas entre os genótipos sensível e tolerante e segundo Korndörfer (2006) os mecanismos que atuam na redução da toxidez de alumínio podem ser diferentes para a mesma espécie, em função da variabilidade genotípica.

As concentrações de silício no tecido vegetal da parte aérea dos genótipos de milho diferiram significativamente ($P < 0,05$) entre os tratamentos (Tabela 2). A presença de 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 foi alterada em função de fontes de silício e o tipo de solo, com aumentos crescentes em relação às doses adicionadas ao solo.

Tabela 2. Concentração de silício no tecido vegetal e no extrato aquoso da parte aérea e de raízes de dois genótipos de milho cultivados em soluções tratamento contendo $0,014 \text{ mmol dm}^{-3}$ de silício (Si) e $0,025 \text{ mmol dm}^{-3}$ de alumínio (Al).

Genótipo	Tratamento			
	Sem Al e Si	Si	Al	Com Al e Si
Tecido vegetal				
..... parte aérea, mg kg^{-1}				
8POA	69,3 Ac	384,0 Aa	202,0 Ab	231,3 Ab
P21Y	93,0 Ab	427,6 Aa	139,3 Ab	94,3 Bb
..... raízes, mg kg^{-1}				
8POA	161,6 Ac	2.181 Ab	186,6 Ac	2.870 Aa
P21Y	245,3 Ab	1.604 Ba	182,3 Ab	1.892 Ba
Extrato aquoso				
..... parte aérea, mmol dm^{-3}				
8POA	0,15 Ab	0,76 Aa	0,07 Ab	0,70 Aa
P21Y	0,12 Ab	0,71 Aa	0,09 Ab	0,58 Aa
..... raízes, mmol dm^{-3}				
8POA	0,08 Ac	0,92 Aa	0,08 Ac	0,51 Bb
P21Y	0,08 Ab	0,74 Aa	0,07 Ab	0,82 Aa

Médias seguidas com letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas distintas na linha diferem entre si ao nível de significância de 5% pelo Teste de Tukey ($P < 0,05$).

Nas raízes, os TSi e TSiAl+ apresentaram maiores concentrações de silício quando comparados aos tratamentos TSiAl- e TAl, independente da presença ou não de alumínio (Tabela 2). Entretanto, a presença de alumínio no TSiAl+ diminuiu suas concentrações na parte aérea dos genótipos de milho, principalmente no tolerante ao alumínio (P21Y). A relação silício/alumínio atuou em algum mecanismo que possibilitou o acúmulo diferencial de silício entre os genótipos de milho. Os depósitos de silício 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 silício (KAMENIDOU et al., 2009). Por isso, ocorreram diferenças nas concentrações de silício entre os genótipos de milho sensível e tolerante ao estresse de alumínio, no tratamento que contém ambos os

elementos. Possivelmente, no genótipo sensível, o silício acumulou no sistema radicular onde se expressa a toxidez de alumínio.

No extrato aquoso da parte aérea e das raízes verificou-se que os TSi e TSiAl+ apresentaram maiores concentrações ($P < 0,05$) de silício do que nos TAl e TSiAl-, em ambos os genótipos (Tabela 2). Porém, a presença de alumínio no TSiAl+ diminuiu a concentração de silício no extrato aquoso de raízes do genótipo sensível em relação ao TSi ($P < 0,05$). No genótipo sensível, além da presença de alumínio e silício causar uma diminuição na concentração de silício no extrato aquoso de raízes, provocou um aumento nas concentrações de silício no tecido vegetal das raízes (Tabela 2). Isso pode indicar que houve uma coprecipitação do alumínio e silício nas células epidérmicas e do córtex, conforme citado por Wang et al. (2004).

Embora os resultados tenham apontado diferenças significativas ($P < 0,05$) nas concentrações de alumínio na parte aérea dos genótipos de milho, estas foram tão baixas que provavelmente não tiveram efeito direto sobre a parte aérea das plantas (Tabela 3). As concentrações de alumínio no tecido vegetal das raízes apresentaram diferenças

significativas ($P < 0,05$) entre os tratamentos (Tabela 3). Yang et al. (2008) estudando mecanismos de exclusão de alumínio em genótipos de arroz verificaram que a concentração de alumínio no ápice de raiz do genótipo resistente foi sensivelmente inferior ao genótipo sensível.

Tabela 3. Concentração de alumínio no tecido vegetal e no extrato aquoso da parte aérea e de raízes de dois genótipos de milho cultivados em soluções tratamento contendo $0,014 \text{ mmol dm}^{-3}$ de silício (Si) e $0,025 \text{ mmol dm}^{-3}$ de alumínio (Al).

Genótipo	Tratamento			
	Sem Al e Si	Si	Al	Com Al e Si
Tecido vegetal				
..... parte aérea, mg kg^{-1}				
8POA	31,6 Ab	39,3 Aa	33,3 Bab	23,3 Bc
P21Y	35,0 Ab	32,3 Bb	49,0 Aa	37,0 Ab
..... raízes, mg kg^{-1}				
8POA	67,6 Ab	71,3 Ab	523,8 Aa	507,3 Aa
P21Y	89,8 Ab	92,0 Ab	566,3 Aa	556,3 Aa
Extrato aquoso				
..... parte aérea, mmol dm^{-3}				
8POA	0,037 Aa	0,026 Aab	0,033 Aab	0,025 Ab
P21Y	0,021 Aa	0,015 Aa	0,023 Aa	0,023 Aa
..... raízes, mmol dm^{-3}				
8POA	0,031 Ac	0,029 Ac	0,581 Aa	0,398 Ab
P21Y	0,030 Ab	0,034 Ab	0,417 Ba	0,380 Aa

Médias seguidas com letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas distintas na linha diferem entre si ao nível de significância de 5% pelo Teste de Tukey ($P < 0,05$).

No tratamento TSiAl+, os genótipos não diminuíram as concentrações de alumínio no tecido de raiz, podendo indicar, que pode estar ocorrendo uma codeposição de alumínio com silício na parede celular dos tecidos. No caso do genótipo sensível, a concentração de alumínio no extrato aquoso diminuiu no TSiAl+, comparado com o TAl. Segundo Wang et al. (2004), a principal localização do alumínio nas raízes (parede das células da epiderme e do córtex) não modifica significativamente na presença de silício, mas a quantidade de alumínio presente nestes sítios é marcadamente aumentada.

No genótipo sensível, a redução da concentração de alumínio no extrato aquoso de raízes diminuiu o efeito tóxico do alumínio, pois no TSiAl+ houve aumento do comprimento de raízes em função da adição de silício (Tabelas 1 e 3). O genótipo sensível (8POA) se beneficiou com a adição de silício na presença de alumínio devido formação de compostos aluminossilicatos na parede celular do córtex de raízes, inibindo a absorção de alumínio 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 alumínio devido à sua complexação interna por ácidos orgânicos (MA, 2000; PIÑEROS et al., 2002). Na cultura do milho, Wang et al. (2004) observaram que não houve alterações nas concentrações de alumínio no ápice de raízes na ausência ou presença de alumínio.

Houve diferenças significativas ($P < 0,05$) na concentração de cálcio no tecido vegetal da parte aérea e de raízes entre os tratamentos e entre os genótipos (Tabela 4). O menor teor de cálcio na parte aérea no tratamento contendo alumínio provavelmente seja um efeito secundário da menor absorção de cálcio devido ao menor crescimento radicular e ao dano nas células envolvidas no processo de absorção e transporte de cálcio, uma vez que o alumínio diminuiu a absorção e a translocação de cálcio para a parte aérea dos genótipos de milho (coloque uma citação). O alumínio interage com as cargas residuais presentes nos grupamentos fosfato da dupla hélice do DNA, reduzindo ou inibindo a divisão celular (RAMÍREZ-BENÍTEZ et al., 2009). Relatos sugerem também

que a toxidez de alumínio esteja ligada a mudanças na homeostase celular do cálcio e no bloqueio dos

canais de cálcio na membrana plasmática.

Tabela 4. Concentração de cálcio no tecido vegetal e no extrato aquoso da parte aérea e de raízes de dois genótipos de milho cultivados em soluções tratamento contendo 0,014 mmol dm⁻³ de silício (Si) e 0,025 mmol dm⁻³ de alumínio (Al).

Genótipo	Tratamento			
	Sem Al e Si	Si	Al	Com Al e Si
Tecido vegetal				
..... parte aérea, mg kg ⁻¹				
8POA	3.000 Aa	3.400 Aa	1.600 Ac	2.300 Ab
P21Y	3.200 Aa	3.600 Aa	1.000 Bc	2.600 Ab
..... raízes, mg kg ⁻¹				
8POA	3.000 b	2.100 Bc	1.400 Bd	4.600 Aa
P21Y	3.600 b	6.700 Aa	2.600 Ac	2.200 Bc
Extrato aquoso				
..... parte aérea, mmol dm ⁻³				
8POA	24,9 Aa	20,6 Ab	7,17 Ad	11,3 Ac
P21Y	18,1 Ba	18,9 Aa	6,21 Ab	7,68 Ab
..... raízes, mmol dm ⁻³				
8POA	13,2 Ba	12,3 Ba	7,60 Bb	11,2 Aa
P21Y	17,0 Aa	15,7 Aab	11,8 Ac	12,8 Abc

Médias seguidas com letras maiúsculas distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha diferem entre si ao nível de significância de 5% pelo Teste de Tukey (P<0,05).

As células epidérmicas, endodérmicas e corticais afetadas por alumínio, rapidamente se autolizam tornando-se inchadas e desorganizadas. Os danos 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). Com isso o transporte de cálcio para a parte aérea pode ser prejudicado. Além de sua função como componente estrutural, o cálcio tem uma função importante como mensageiro secundário na condução de sinais de fatores do ambiente (MCAINSH; HETHERINGTON, 1998), e respostas das plantas em termos de crescimento e desenvolvimento. Por isso, alterações nas concentrações de cálcio podem influenciar significativamente o desenvolvimento de plantas.

O silício afetou a absorção e a translocação de cálcio, por causa da presença de silício no TSiAl+ houve aumento na concentração de cálcio na parte aérea em relação ao tratamento contendo somente alumínio. É possível que o silício diminua a toxidez de alumínio indiretamente por meio do efeito na absorção e transporte de cálcio (WANG et al. 2004; EPSTEIN, e BLOOM, 2005) (coloque uma citação). A adição de silício na solução tratamento teve efeito nas concentrações de cálcio no tecido vegetal das raízes de ambos os genótipos de milho. No genótipo tolerante o tratamento contendo silício apresentou maior teor de cálcio em relação aos

demais tratamentos. O mecanismo de tal efeito não pode ser explicado com os resultados do presente trabalho porque os os mesmos não foram isolados.

No genótipo sensível à toxidez de alumínio (8POA) foi verificado que as concentrações de cálcio nas raízes foram alteradas na presença de alumínio, somente de silício e na presença de alumínio e silício. O silício isolado diminuiu a concentração de cálcio, enquanto na presença de alumínio aumentou as concentrações de cálcio. O aumento na concentração de cálcio quando adicionado silício pode ocorrer devido o silício inibir a ligação do alumínio com as proteínas carregadoras de cálcio, possibilitando que o cálcio entre no simplasto e seja transportado para a parte aérea.

A concentração de cálcio no extrato aquoso da parte aérea diferiu significativamente (P<0,05) entre os tratamentos e entre os genótipos (Tabela 4). A presença de silício e alumínio aumentou a concentração de cálcio no genótipo sensível e não alterou a concentração de cálcio no genótipo tolerante, quando comparado ao tratamento contendo somente alumínio. Verificou-se que no genótipo sensível à toxidez de alumínio houve uma relação entre silício e alumínio, aumentando a concentração de cálcio em relação ao genótipo tolerante. (explore melhor essas informações, relacione cálcio, silício e alumínio). É possível que

o silício reduza a toxidez de alumínio indiretamente através de seu efeito na absorção e transporte de cálcio. Hodson; Sangster (1993) observaram que a concentração de cálcio na parede celular do córtex das raízes de *Sorghum bicolor* foi reduzida quando as plantas cresceram em solução tratamento contendo 0,1 mmol dm⁻³ de alumínio. Quando as plantas cresceram em uma solução tratamento contendo 0,1 mmol dm⁻³ de alumínio e 2,8 mmol dm⁻³ de silício, a concentração de cálcio na parede celular foi superior ao controle. Delhaize; Ryan (1995) estudando genótipos de trigo observaram que as absorções de cálcio na presença de alumínio em genótipos sensíveis ao alumínio, também foram significativamente maiores do que em genótipos tolerantes.

No extrato aquoso de raízes a presença de silício (TSi) não alterou significativamente (P<0,05) a concentração de cálcio, em ambos os genótipos, em relação à TSiAl-. O tratamento com alumínio (TAI) diminuiu a concentração de cálcio, em ambos os genótipos, em comparação com ao TSiAl-. Porém, no tratamento TSiAl+, a concentração de cálcio aumentou no genótipo sensível e não foi alterada no genótipo tolerante, quando comparado ao tratamento com alumínio (TAI)(Tabela 4). No genótipo sensível, a presença de silício associada ao alumínio, aumentou a concentração de cálcio influenciando o processo de divisão celular (Tabela 1). Wang et al. (2004) em estudo semelhante com genótipos de milho constataram a diminuição dos sintomas de toxidez de alumínio em decorrência da interação do silício com o alumínio alterando a relação cálcio/alumínio e reduzindo o efeito do alumínio no processo de divisão celular na região meristemática das raízes. O cálcio, segundo Vitti et al. (2006), atua como componente estrutural atua como mensageiro secundário na condução de sinais

de fatores do ambiente e resposta das plantas em termos de crescimento e desenvolvimento.

A toxidez de alumínio tem sido associada com a deficiência de cálcio (KOCHIAN, 1995). Então é possível que o maior crescimento das plantas no tratamento contendo alumínio e silício no genótipo sensível (8POA) seja devido à diminuição da deficiência de cálcio na presença de silício. Uma possibilidade é que o silício diminua a toxidez de alumínio através do efeito indireto na absorção e transporte de cálcio. Segundo Kochian (1995), há uma grande diferença na sensibilidade no sistema de transporte de cálcio na presença de alumínio, tanto em genótipos tolerantes como em sensíveis de trigo, sugerindo diferenças genótípicas no funcionamento dos canais de cálcio.

Segundo Vitti et al. (2006) o íon cálcio possui um papel central na regulação de vários processos incluindo a mitose e a citocinese. Então, a redução na concentração de cálcio obtida neste estudo pode ser devida ao fato do alumínio inibir o influxo de cálcio para as células, influenciando a divisão celular. Na presença de alumínio e silício, este efeito foi diminuído (Tabela 4).

CONCLUSÕES

O silício reduziu o efeito tóxico do alumínio em genótipos de milho.

A redução na toxidez de alumínio devido à presença de silício está relacionada ao aumento do transporte de cálcio para a parte aérea e ao efeito positivo no índice mitótico, principalmente no genótipo sensível ao alumínio.

As concentrações de silício, alumínio e cálcio no extrato aquoso explicam as eventuais diferenças entre genótipos causadas pelas relações silício-alumínio.

ABSTRACT: To verify the relation between aluminum and silicon in the growth of two maize genotypes resistant and sensitive at toxicity aluminum was carried out in the greenhouse a bioensaio involving the treatments presence and absence of aluminum and silicon in corn genotypes. The treatments were compound for solutions of 2.0 mmol L⁻¹ calcium (CaCl₂) without and with aluminum (0.025 mmol L⁻¹ AlCl₃) and silicon (0.14 mmol L⁻¹, to part solution SiO₂). The experiment was carried out for five days and for assess the treatments effect were evaluated root length, silicon, aluminum and calcium concentrations in the shoots and in the roots and the mitotic index of meristematic cells of roots. Silicon reduced the toxic effect of aluminum in corn genotypes as evaluated through root length.

KEYWORDS: *Zea mays*. Aqueous extract. Toxicity aluminum. Calcium. Mitotic index.

REFERÊNCIAS

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237 p.

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

CANÇADO, G. M. A.; LOPES, M. A.; PAIVA, E. Genética e bioquímica da tolerância de plantas ao alumínio. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa, MG: SBCS; Lavras: UFLA: DCS, 1999. p. 363-388.

EPSTEIN, E. Silicon in plants: facts vs. concepts. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 1-15.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2. ed. Massachusetts: Sinauer Associates, 2005. 380 p.

GUNES, A.; PILBEAM, D. J.; INAL, A.; COBAN, S. 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.

HALLMARK, C. T.; WILDING, L. P.; SMECK, N. E. Silicon. In: PAGE, A.L. **Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties**. 2. ed. Madison: ASA: SSSA, 1982. v. 2, part. 2, cap. 15, p. 263-273. (ASA. Agronomy, 9).

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.

KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 46, p. 237-60, 1995.

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.

LABORIAU, L. G.; SENDULSKY, T. Corpos silicosos de gramíneas dos cerrados. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v.38, p.159-170, 1966.

LIANG, Y.; SUN, W. C.; ZHU, Y. G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, Essex v. 147, p. 422-428, 2007.

LIANG, Y.; YANG, C.; SHI, H. Effects of silicon on growth and mineral composition of barley grown under toxic levels of aluminium. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, p. 229-242, 2001.

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.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. 2. ed. São Paulo: Ceres. 2006. 638 p.

MCAINSH, M. R.; HETHERINGTON, A. M. Encoding specificity in Ca²⁺ signaling systems. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 3, n.1, p.32-36, 1998.

NANAYAKARA, U. N.; UDDIN, W.; DATNOFF, L. E. Application of silicon sources increases silicon accumulation in perennial ryegrass turf on two soil types. **Plant and Soil**, The Hague, v. 303, p.83-94, 2008.

PALMER, R. G., HEER, H. A root ratio squash technique for soybean chromosomes. **Crop Science**, Madison, v. 13, p. 389-391, 1973.

- PIÑEROS, M. A.; MAGALHAES, J. V.; ALVES, V. M. C.; KOCHIAN, L. V. The physiology and biophysics of aluminum tolerance mechanism based on root citrate exudation in maize. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 129, n. 3, p. 1194-1206, 2002.
- RAMÍREZ-BENÍTEZ, J.E.; HERNANDÉZ-SOTOMAYOR, T.; MUÑOZ-SANCHÉZ, A. The location of aluminum in protoplasts and suspension cells taken from *Coffea Arabica* L. with different tolerance of Al. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 103, n. 11, p. 1491-1496, 2009.
- SACCONE, L.; CONLEY, D. J.; LIKENS, G. E.; BUSO, D. C.; JOHNSON, C. E. Factors that Control the Range and Variability of Amorphous Silica in Soils in the Hubbard Brook Experimental Forest. **Soil Science Society American Journal**, Madisons, v. 72, n. 6, p. 1637-1644, 2008.
- 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. 151-159, 1997.
- SILVA, L. S.; BOHNEN, H. Rendimento e acúmulo de nutrientes pelo arroz em solução nutritiva com e sem a adição de silício. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, p. 771-777, 2001.
- SONOBE, K.; HATTORI, T.; A. N. P.; TSUJI, W.; ENEJI, E.; TANAKA, K.; INANAGA, S. Diurnal variations in photosynthesis, stomatal conductance and leaf water relation in sorghum grown with or without silicon under water stress. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 32, n. 3, p. 433-442, 2009.
- TEDESCO, M. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p. (UFRGS. Boletim Técnico de Solos, 5).
- 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.
- WANG, Y.; STASS, A.; HORST, W. J. Aploplastic binding of aluminum is involved in silicon – induced Amelioration of aluminum toxicity in mayze. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 136, p. 3762-3770, 2004.
- WILDING, L. P.; SMECK, N. Silicon. In: HALLMARK, C. T.; WILDING, L. P.; SMECK, N. E. Methods of soil analysis. Madison: ASA, 1982. Part 2. 2. ed. p. Madison: Agronomy. Monograph, 1982, p.263–273. Mudar a citação no texto, pois o autor do cap. é: HALLMARK, C. T. et al.excluir a referência.
- YANG, J. L.; LI, Y.Y.; ZHANG, Y. J.; ZHANG, S. S.; WU, Y. R.; WU, P.; ZHENG, S. J. **Cell wall polysaccharides are specifically involved in the exclusion of aluminum from the rice root apex**. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 146, p. 602-611, 2008.
- ZANÃO JÚNIOR, L. A.; RODRIGUES, F. A.; FONTES, R. L. F.; KORNDÖRFER, G. H.; NEVES, J. C. L. Rice resistance to brow spot mediated by silicon and its interaction whit manganese. **Journal of Phytopathology**, Berlin, v. 157, p. 73-78, 2009.