

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo deste trabalho será disponibilizado somente a partir de 22/08/2018.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO ATENUA OS EFEITOS TÓXICOS DO ALUMÍNIO EM
PLANTAS JOVENS DE CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADAS
EM HIDROPONIA**

Gilmar da Silveira Sousa Junior

Agroecólogo

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO ATENUA OS EFEITOS TÓXICOS DO ALUMÍNIO EM
PLANTAS JOVENS DE CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADAS
EM HIDROPONIA**

Gilmar da Silveira Sousa Junior

Orientadora: Profa. Dra. Durvalina Maria Mathias dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Custódio Gasparino

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

2017

Sousa Junior, Gilmar da Silveira
S725s Silício atenua os efeitos tóxicos do alumínio em plantas jovens de
cana-de-açúcar cultivadas em hidroponia / Gilmar da Silveira Sousa
Junior. – – Jaboticabal, 2017
64 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017
Orientadora: Durvalina Maria Mathias dos Santos
Coorientador: Eduardo Custódio Gasparino
Banca examinadora: Priscila Lupino Gratão, Fabio Luís Ferreira
Dias
Bibliografia

1. *Saccharum* spp. 2. Estresse ácido. 3. Osmólitos compatíveis. 4.
Estresse oxidativo. 5. Anatomia radicular. I. Título. II. Jaboticabal-
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633.61:631.45

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

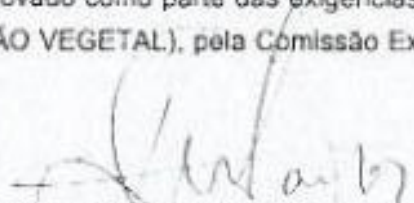
TÍTULO: SILÍCIO ATENUA OS EFEITOS TÓXICOS DO ALUMÍNIO EM PLANTAS JOVENS DE CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADAS EM HIDROPONIA

AUTOR: GILMAR DA SILVEIRA SOUSA JÚNIOR

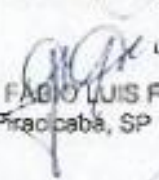
ORIENTADORA: DURVALINA MARIA MATHIAS DOS SANTOS

COORIENTADOR: EDUARDO CUSTODIO GASPARINO

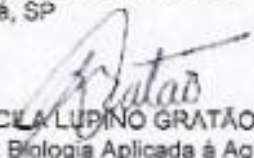
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. DURVALINA MARIA MATHIAS DOS SANTOS
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. FÁBIO LUIS FERREIRA DIAS
APTA / Piracicaba, SP



Profa. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 22 de fevereiro de 2017.

GILMAR DA SILVEIRA SOUSA JUNIOR – nascido em 19 de março de 1988, em Araraquara-SP, é Agroecólogo, formado pela Universidade Federal de São Carlos – Centro de Ciências Agrárias, em dezembro de 2014. Foi bolsista CNPq de iniciação científica no período de 2012 a 2013 e FUNDAG de 2013 a 2014, neste último período de iniciação científica trabalhou e realizou projetos em nutrição e manejo na cultura da cana-de-açúcar. Em março de 2015 iniciou o curso de mestrado em Agronomia - Produção Vegetal, na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Câmpus Jaboticabal. Durante o período de realização do curso de mestrado, foi bolsista do programa de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

“A utopia está lá no horizonte. Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos. Caminho dez passos e o horizonte corre dez passos. Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei. Para que serve a utopia? Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar.”

Eduardo Galeano citando Fernando Birri

“Se um dia, já homem feito e realizado, sentires que a terra cede a teus pés, que
tuas obras desmoronam, que não há ninguém à tua volta para te estender a mão,
esquece a tua maturidade, passa pela tua mocidade, volta à tua infância e balbucia,
entre lágrimas e esperanças, as últimas palavras que sempre te restarão na alma:
minha mãe, meu pai.”

(Rui Barbosa)

À **Deus** e sempre a Ele, por ter me dado vocês **Gilmar da Silveira Sousa** e **Vanilda
Ferrarrezi Sousa**, meus pais, pelas vezes em que a terra cedeu aos meus pés e
vocês estavam ali e sempre vão estar com o abraço e a palavra certa.

DEDICO

Por acreditar que o que temos de mais valioso é o tempo.

OFEREÇO...

...esse trabalho à minha orientadora **Profa Dra Durvalina Mathias dos Santos**, por cada momento de paciência, amizade, dedicação, compreensão e responsabilidade em me mostrar sempre o melhor caminho a ser seguido.

AGRADECIMENTOS

À **Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”** – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias pela oportunidade de realização do mestrado;

À **CAPES** pela auxílio financeiro para a condução do estudo;

Ao meu coorientador **Eduardo Custódio Gasparino**, por todas as vezes que você sempre me recebeu com paciência e educação, quero levar pra minha formação todos os exemplos de conhecimento, comportamento e humildade que você me ensinou;

À minha irmã **Grace Silva**, meu cunhado **Paulo Silva**, e as minhas sobrinhas, por serem as pessoas que mais torcem por mim;

À minha **Família**, principalmente aos meus avós **Isolina**, **Euclides** (*in memoriam*), e **Joel**, por todo incentivo e preocupação, em especial a minha avó **Tereza** (*in memoriam*) quando criança em nossas conversas nunca pensamos que eu chegaria até aqui, mas cheguei com suas palavras e por lembrar que o caminho vale mais que a chegada;

À **Ana Carolina Simamura**, pelo amor, apoio, parceria, carinho e dedicação em fazer dos momentos tensos do mestrado, momentos de conversas e amadurecimentos;

Aos meus amigos-irmãos, **Willian Duarte** e **César Zanello**, embora a distância tenha nos separados, foi com ela que eu descobri o quanto irmãos vocês são;

Aos amigos da graduação **Jessica Freitas**, **Luciano Delmondes** e **Hugo Romania**, por todas as vezes que mesmo distante vocês estiveram perto e me ajudaram com o melhor apoio;

Aos irmãos que fiz durante esse processo de mestrado, **Murillo**, **Felipe** e **Sthefani**, no meio de tantas mudanças vocês se tornaram meus irmãos e com vocês eu dividi não só os momentos bons, mas dividi todos os problemas e isso fez de vocês pessoas importantes para mim;

Aos irmãos da REP. ANTRO DO HV, **Otavio**, **Buda (Augusto)**, **Dido/Yudi/Anão (Cleber)**, **Tofu (Diego)**, **Aladim (Thiago)**, **Frito (Vinicius)**, **KY-rex (Kayo)**, **Pumba (João)**, **Balu (Marcelo)**, **Mariano (Felipe)** e **Naza (Carlos)**, por todos os conselhos, risadas, mural de perolas, idas ao SAPÃO e churras na rep. Vocês todos me

mostraram que a vida, o meio acadêmico e as nossas escolhas em seguir nesse meio, pode e deve ser prazerosa. Vocês fizeram com que um lugar totalmente diferente torna-se minha casa e hoje você são e sempre serão meus irmãos;

À minha **Família ANTRO DO HV** (Moradores, ex-moradores, esposas dos ex-moradores e namoradas, pelas vezes que fizeram de um república um lar, uma família e um lugar bom para se cultivar uma boa amizade a base de conversas e cerveja) e em especial a **Jussara (JUJU)** pelas vezes em que organizou a rep. e fez do nosso ambiente um lugar habitável.

À **Rita de Cássia, Domingos Ferreira Jr. e Augusto Traira** por toda amizade, parceira e ajuda em todo o processo de montagem, avaliações e desmontagem do trabalho, sem vocês eu ainda estaria levando os baldes de solução nutritiva;

À **Sonia Carregari** (Sônica), por todo o seu conhecimento e por saber passar de uma maneira singular cada detalhe de cada protocolo e por ser a pessoa que é e por saber sempre ter o abraço mais aconchegante e a palavra mais amiga que alguém pode dar a uma pessoa,

Ao **Jamil Ferraz** por toda ajuda durante o trabalho e por sempre estar disposto a ajudar e cooperar;

À **Roseli Munhoz** pelos pequenos momentos de ajuda com as raízes, pelas conversas e pelo carinho que sempre me tratou;

As meninas do Lab de morfologia vegetal **Cintia e Fernanda**, pelas pequenas ajudas em me ensinar todas as vezes como liga os aparelhos e pela paciência e educação que sempre me trataram;

À **Denise Chiconato** pela amizade, conselhos, BSL e pastel as 16h no Sapão. Sem você o primeiro momento no laboratório não seria o mesmo, no meio de tantas perdas pela distancia você me fez me sentir em casa em um lugar totalmente desconhecido;

Aos meus colegas do Lab. de Fisiologia Vegetal, **Leonardo, Antônio, Joel, Leticia, Lucas, Rafael, Patrícia, Emilaine, Marina e Paloma** sem vocês todos os trabalhos seriam mais difíceis, teriam menos risadas e com certeza não seria a mesma coisa. Em especial agradeço a **Mirela e Mayara** por todas as vezes que vocês não foram apenas IC, vocês foram amigas e me ajudaram, seja no trabalho ou com uma palavra de incentivo;

Aos amigos, **Danubia, Rodolfo, Greice, Alexson, Larissa, Willian, Ana e Neriane**, cada um de vocês tiveram e vão sempre ter um admiração minha seja pelas nossas conversas ou pela humildade que cada um leva em viver e beber uma "quase" toda sexta depois das 17:00h;

À minha família que ganhei na graduação, **Janaina Torres, Luciana Dias e Fábio Dias** por toda ajuda e conselhos, mesmo com a distância e não tendo mais que me orientar, vocês sempre estiveram presentes e por isso eu serei sempre grato e pronto ajudar, sem vocês a minha formação não seria a mesma e eu não estaria aqui;

Aos Professores **Priscila Lupino Gratão e Rogério Falleiro Carvalho**, pelas dicas, conselhos e amizade ao longo do meu mestrado, vocês se tornaram amigos e isso fez com que eu os admirasse ainda mais;

Aos meus ex-orientadores **Andréa Pimentel, Rodolfo Figueiredo e Katia Kupper** e as minhas sub ex-orientadoras **Tatiane Cunha e Mariana Klein** pelas vezes em que não passaram a mão na minha cabeça e me ensinaram a nunca desistir.

À todos os funcionários e professores do Departamento de Biologia, em especial a **Eliane Alves, Aldo Souza, Aracyara Afonso e Marcia Macri** pelas vezes em que vocês me ajudaram com alguma informação, conversa ou preocupação;

Ao meu filho-Dog **Prince** e aos meus sobrinhos-Dog, **Jackinho, Hoffmann, Brahma, Vick, Chico, Tomas e Carla** (*in memoriam*), pelas vezes em que eu chegava em casa e vocês me esperavam, pulando, correndo, mordendo ou parados com preguiça (Prince) fazendo uma enorme diferença;

À todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui.

...MUITO OBRIGADO!!!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	2
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUÇÃO.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1. Toxidez de alumínio.....	7
3.2. Silício	8
3.3. Cana-de-açúcar (<i>Saccharum spp.</i>).....	9
3.4. Parametros bioquímicos, fisiológicos em plantas sob estresse por Al	10
3.4.1. Solutos Organicos: Prolina e Glicina betaína	10
3.5. Estresse Oxidativo	12
3.6. Pigmentos Clorofilianos.....	13
3.7. Morfoanatomia de raízes	14
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4.1. Delineamento experimental	16
4.2. Obtenção do material propagativo e Características das cultivares.....	16
4.3. Crescimento em solução nutritiva.....	17
4.4. Osmolitos Compatives: prolina(PRO) e glicina betaina (GB).....	17
4.5. Peroxidação lipídica (H₂O₂ e MDA).....	18
4.6. Crescimento: acúmulo de biomassa	19
4.7. Clorofilas.....	19
4.8. Anatomia de raízes	20
4.9. Analise estatística	21
5. Resultados e Discussão.....	22
6. Conclusão.....	44
REFERÊNCIAS.....	45

PLANTAS JOVENS DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB EFEITO TÓXICO DO ALUMÍNIO NA AUSÊNCIA OU PRESENÇA DE SILÍCIO

RESUMO – Visando constatar se o silício (Si) atenua a toxidez do alumínio (Al) em plantas jovens de cana-de-açúcar, neste trabalho foram estudados em plantas jovens de cana-de-açúcar, os parâmetros fisiológicos de acúmulo de biomassa, peroxidação lipídica com a avaliação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e ácido malondialdeído (MDA), teores de compostos não-enzimáticos antioxidantes, prolina (Pro) e glicina betaína (GB), pigmentos clorofilianos (chl a e b) e anatomia das raízes. O delineamento experimental foi em esquema fatorial $2 \times 4 \times 2$, com duas cultivares (CTC9002 e CTC9003), quatro concentrações de sulfato de Al (0,0; 10,0; 15,0 e 20,0 mg L⁻¹) e duas concentrações de silicato de potássio, ausência (0,0 mg L⁻¹) e presença (2,0 mmol L⁻¹). Foram realizadas três repetições em triplicata em todas as avaliações, exceto para crescimento, onde foram realizadas apenas as repetições. Para a obtenção de plantas jovens, os minitoletes de ambas cultivares foram cultivados em areia esterilizada por 30 dias. Após este período, as plantas foram aclimatadas por 10 dias em solução nutritiva. A seguir, procedeu-se aos tratamentos de Al nas plantas jovens, as quais foram cultivadas hidroponicamente por 15 dias. Os tratamentos com Si foram realizados ao término deste período, permanecendo as plantas sob toxidez de Al e tratadas na ausência ou presença de Si por mais 20 dias. Todas as avaliações biológicas foram realizadas aos 35 dias dos tratamentos de Al e Si. Comparando-se os resultados obtidos nas plantas jovens de cana-de-açúcar sob toxidez de Al e com ausência de Si, verificou-se que em plantas com suplementação de Si houve significativa melhora do crescimento, que pode ser atribuída pela redução da peroxidação lipídica devido à diminuição de H_2O_2 e MDA, pelo maior acúmulo de prolina e pela menor redução nos teores de clorofilas a e b, além da redução dos efeitos deletérios causados pelo Al nas raízes. Ao contrário dos resultados de Pro, os teores de GB foram reduzidos pelo Si nas plantas sob toxidez de Al, não tendo atividade antioxidante pela adição de Si. Conclui-se que, de modo geral, a presença de Si causou atenuação do estresse por Al em ambas as cultivares de cana-de-açúcar, com maior mitigação dos efeitos do Al na cv. CTC9003 que apresentou menor sensibilidade à toxidez comparada com a cv. CTC9002.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., estresse ácido, osmólitos compatíveis, estresse oxidativo; pigmentos, anatomia radicular.

YOUNG SUGARCANE PLANTS UNDER ALUMINUM TOXICITY IN THE ABSENCE OR PRESENCE OF SILICON

ABSTRACT – Aiming to evaluate if Silicon (Si) ameliorates Aluminum (Al) toxicity in young sugarcane plants, at this work were assessed physiological parameters of biomass accumulation, lipid peroxidation through evaluation of hydrogen peroxide (H₂O₂) and malondialdehyde (MDA), contents of the non-enzymatic compounds proline (Pro) and glycine betaine (GB), and chlorophyll pigments (chl a and b). Furthermore, to determine if there was Si attenuated deleterious effects caused by Al, an anatomical study of roots was carried out. The experimental design was a 2x4x4 layout, with two sugarcane cultivars (CTC9002 and CTC9003), four Al sulfate concentrations (0.0; 10.0; 15.0; and 20.0 mg L⁻¹) and two potassium silicate concentrations, absence (0.0 mg L⁻¹) and presence (2.0 mmol L⁻¹). There were three replicates in triplicate for each evaluation, except for growth. For obtaining young plants, micro seed pieces were sown and grown in sterilized sand for 30 days. After this period, the plants were acclimated in nutrient solution for 30 days. Then, the plants were submitted to the Al treatments, and grown in hydroponics for 15 days. Only then Si treatments were applied, with plants growing under Al toxicity and in the presence or absence of Si for additional 20 days. All the biological evaluations were performed 35 days after the plants were exposed to Al and Si treatments. Comparing the results obtained from young plants under Al toxicity and without Si, it was verified that Si supply improved growth, what can be attributed to a decrease in lipid peroxidation verified through lower H₂O₂ and MDA rates, to higher accumulation of proline and lower decrease in chlorophyll a and b contents, besides the mitigation of deleterious effects caused by Al in roots. Unlike Pro results, GB contents were reduced by Si in plants under Al stress, not having antioxidant activity through Si addition. It is concluded that Si presence ameliorated Al stress in both sugarcane cultivars, with higher protection to cv. CTC9003, which demonstrated lower sensitivity to toxicity when compared to cv. CTC9002.

Keywords: *Saccharum* spp., acid stress, compatible osmolytes, oxidative stress; Pigments, root anatomy.

1. INTRODUÇÃO

Em áreas tropicais e subtropicais úmidas é comum a ocorrência de solos ácidos, com pH abaixo de 5,5 que disponibilizam alumínio (Al) em nível tóxico. O estresse por Al é um dos mais sérios fatores limitantes para a produtividade vegetal em solos ácidos, que constituem cerca de 50% das terras cultiváveis do mundo, causando entre 25% a 80% de perdas no campo dependendo da espécie (MA et al., 2014; SADE et al., 2016). No Brasil, 32% dos solos exibem toxicidade do Al (ABREU et al., 2003; NAVASCUÉS et al., 2012). O Al é encontrado sob diferentes formas, como aluminossilicatos insolúveis ou óxidos, que favorecem a liberação na solução do solo do Al tóxico, denominado Al^{3+} , que permanece, predominantemente, retido pelas cargas negativas das partículas do solo (ARUNAKUMARA et al., 2013; MA et al., 2014). O efeito tóxico do Al nas plantas provoca sintomas imediatos e acentuados, particularmente, na redução do crescimento da raiz (HORST et al., 2010; SILVA, 2012; ARUNAKUMARA et al., 2013; MATSUMOTO; MOTODA, 2012; 2013; EMAMVERDIAN et al., 2015). Porém estudos relatam também o efeito do Al na redução dos teores de clorofilas das folhas o que corresponde ao fotossistema e crescimento vegetal (CHEN et al., 2010). Da mesma forma a toxidez do Al induz ao estresse oxidativo (TABALDI et al., 2009; GIANNAKOULA et al., 2010; DAWOOD et al., 2012; INOSTROZA-BLANCHETEAU et al., 2012; SADE et al., 2012), enquanto outros estudos relatam que o estresse oxidativo pode ser consequência da toxidez do Al nas plantas (NAVASCUÉS et al., 2012).

O silício (Si), segundo elemento mais abundante nos solos e não essencial para as plantas (EPSTEIN, 2009), tem sido reconhecido como atenuador dos efeitos deletérios dos estresses abióticos, como a toxicidade do Al. De acordo com LIANG et al. (2007), um dos principais mecanismos da atenuação dos efeitos dos estresses abióticos em plantas superiores mediada pelo Si inclui a estimulação dos sistemas antioxidantes nas plantas. Tais sistemas podem incluir a atividade antioxidante não-enzimática de solutos orgânicos, prolina (Pro) e glicina betaína (GB), que se acumulam para atuar na osmoproteção celular.

O aminoácido Pro e a amina quaternária GB são considerados indicadores dos estresses abióticos, por participar do ajuste osmótico, importante mecanismo

para impedir a diminuição do potencial hídrico celular, mantendo a turgidez e preservando a integridade de compostos e estruturas celulares, fundamentais para a continuidade das atividades vitais (CHEN; MURATA, 2011; GIRI, 2011; PINTÓ-MARIJUAN; MUNNÉ-BOSCH, 2013; WANI et al., 2013; SHARMA et al., 2014). Além do mais, Pro e GB possuem importante função na prevenção dos danos oxidativos provocados pelas espécies reativas de oxigênio (ERO), com a participação da remoção de radicais livres em excesso (GIANNAKOULA et al., 2008; 2010; REJEB et al., 2014; EMAMVERDIAN et al., 2015). As principais formas de ERO são radicais superóxido (O_2^-), hidroxila (OH^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e oxigênio singlete (1O_2), que provocam redução da fluidez de membrana e, conseqüente, maior peroxidação lipídica (MATSUMOTO; MOTODA, 2012; 2013; BARBOSA et al., 2014). Em elevadas concentrações, o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) possui efeito deletério devido à participação na reação formadora de OH^- , oxidante mais reativo da ERO, além de inativar enzimas por oxidação dos grupos tiol (BARBOSA et al., 2014). O aldeído malônico (MDA) é o último produto formado como resultado da peroxidação lipídica da membrana celular e a concentração deste aldeído citotóxico expressa o grau da peroxidação evidenciando conseqüente, dano celular, sendo considerado marcador-chave bioquímico em plantas sob estresses (MOLINARI et al., 2007; SHARMA et al., 2012; COOKE; LEISHMAN, 2016). A peroxidação lipídica pode ser o sintoma mais proeminente do estresse oxidativo causado pelo estresse por Al, uma vez que este íon está relacionado a um aumento do conteúdo de H_2O_2 (TABALDI et al., 2009; GUO et al., 2012; ADREES et al., 2015).

As clorofilas são pigmentos que ocorrem em nos cloroplastos das folhas (STREIT et al., 2005). Clorofilas participam da absorção e conversão da luminosidade em moléculas de ATP e NADPH, que são consumidas pelo ciclo de Calvin e outras reações metabólicas (TAIZ; ZEIGER, 2013). Por essa razão as clorofilas podem ser utilizadas como indicadoras de estresses em plantas, visto que as folhas constituem o local onde se encontra o maquinário fotossintético das plantas (CHEN et al., 2010).

Devido à importância econômica e social da cultura de cana-de-açúcar, pela produção do etanol e açúcar, a partir do ano 2000, o cultivo tem se expandido para o cerrado, região Centro-Oeste, com solo ácido em que o Al trocável tende a ser o

cátion dominante (MANZATTO et al, 2009; CASTANHO; SOUTO, 2014; RIBEIRO et al., 2015).

Estudos sobre o efeito atenuador do Si em cana-de-açúcar sob toxicidade do Al não foram encontrados na literatura. Assim, baseando-se na hipótese que o Si atenua os efeitos da toxicidade do Al, plantas jovens de duas cultivares de cana-de-açúcar foram expostas hidroponicamente em diferentes concentrações de Al na ausência e presença de Si, para verificar se o Si pode estar relacionada com o acúmulo de Pro, GB, redução da peroxidação lipídica, aumento dos teores de clorofilas, aumento da biomassa e anatômica das raízes.

6. Conclusão

1. O Silício atenuou os efeitos do Al^{3+} tóxico na peroxidação lipídica, nos teores de clorofila, na morfoanatomia das raízes e no crescimento de cana-de-açúcar;
2. A prolina pode ser indicador do estresse por alumínio, na ausência e na presença de silício, enquanto glicina betaína apenas na ausência de silício;
3. A cv. CTC9003 é menos sensível ao estresse por alumínio comparada com a cv. CTC9902.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C.H. JR.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A.F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.60, n.2, p.337–343, 2003.
- ADREES, M.; ALI, S.; RIZWAN, M.; ZIA-UR-REHMAN, M.; IBRAHIM, M.; ABBAS, F. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. **Ecotoxicology and Environmental**, v.119, p.186-197, 2015.
- AHMAD, R.; JU LIM, C.; KWON, S. Y. Glycine betaine: a versatile compound with great potential for gene pyramiding to improve crop plant performance against environmental stresses. **Plant Biotechnology Reports**, Daejeon, v. 7, p. 49–57, 2013.
- AHMAD, T.S.; HADDAD, R. Study of silicon effects on antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment of wheat under drought stress. **Czech Journal of Genetics and Plant Breeding**, v.47, p.17-27, 2011.
- ALVAREZ, I. A.; CASTRO, P. R. de C.; NOGUEIRA, M. C. S. Root growth of cane ratoon harvested green or burned. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 653-659, 2000.
- ARNON, D. I. Cooper enzymes in isolated chloroplast polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, Rockville, v. 24, n. 1, p. 1-15, 1949.
- ARUNAKUMARA, K. K. I. U.; WALPOLA, B. C.; YOON, M. Aluminum toxicity and tolerance mechanism in cereals and legumes - a review. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, v. 56, p. -9, 2013.
- ASADA, K. Production and Scavenging of Reactive Oxygen Species in Chloroplasts and Their Functions. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 141, n. 2, p. 391-396, 2006.
- ASHRAF, M.; AHMAD, R.; BHATTI, A. S.; AFZAL, M.; SARWAR, A.; MAQSOOD, M. A.; KANWAL, S. Amelioration of salt stress in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) by supplying potassium and silicon in hydroponics. **Pedosphere**, v.20, n.2, p.153-162, 2010.
- ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v.59, p.206-216, 2007.
- BAKER, N. R. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis *in vivo*. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 59, p. 89-113, 2008.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO, JÚNIOR, W. 2011. **AgroEstat** - Sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos versão 1.1.0.694. Jaboticabal: FCAV/UNESP.

BARBOSA, M. R.; SILVA, M. M. D. A.; WILLADINO, L.; ULISSES, C.; CAMARA, T. R. Plant generation and enzymatic detoxification of reactive oxygen species. **Ciência Rural**, v.44, n.3, p.453-460, 2014.

BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v.39, p.205-207, 1973.

BIENERT, G. P.; MOLLER, A. L.; KRISTIANSEN, K. A.; SCHULZ, A.; MOLLER, I. M.; SCHJOERRING, J. K.; JAHN, T. P. Specific aquaporins facilitate the diffusion of hydrogen peroxide across membranes. **Journal of Biological Chemistry**, v.282, n.2, p.1183-1192, 2007.

BOSE, J.; BABOURINA, O.; RENGEL, Z. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 7, p. 2251-2264, 2011.

BUSO, P.H.M. Estudo do Sistema radicular de cana-de-açúcar no plantio em gema e tolete. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.73p.

CAKMAK, I.; HORST, W.J. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). **Physiol. Plant**. 83:463-468, 1991.

CARLIN, S.D. **Mecanismos fisiológicos de cana-de-açúcar sob efeito da interação dos estresses hídricos e ácido no solo**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 102f., Jaboticabal, 2009

CASTANHO, R. B.; SOUTO, T. S. A importância da orizicultura na constituição do espaço geográfico: evolução e dinâmica da produção de arroz no período de 1930 a 2010 em Ituiutaba (Minas Gerais – MG, Brasil) e a inserção de novas culturas. **Revista Colombiana de Geografía**, v.23, p.93-107, 2014.

CASTRO, P. R. C. **Fisiologia aplicada à cana-de-açúcar**: STAB, 2016. p. 19-29.

CHEN, L. S.; QI, Y. P.; JIANG, H. X.; YANG, L. T.; YANG, G. H. Photosynthesis and photoprotective systems of plants in response to aluminum toxicity. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n.54, p.9237-9247, 2010.

CHEN, T.H.; MURATA, N. Glycinebetaine protects plants against abiotic stress: mechanisms and biotechnological applications. **Plant Cell Environ**, v.34, p.1-20, 2011.

CHEN, T.H.; MURATA, N. Glycinebetaine: an effective protectant against abiotic stress in plants. **Trends Plant Sci**, v.13, p.499–505, 2008.

CLARK, R. B. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. **Plant and Soil**, v.47, p.653-662, 1977.

COOKE, J.; LEISHMAN, M. R. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. **Functional Ecology**, v.30, p. 1340-1357, 2016.

COSTA, L. R. T. **Resposta de cultivares de milho ao alumínio sob doses de silício em solução nutritiva**. 2012. 85p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu.

COSTA, M. C. G.; MAZZA, J. A.; VITTI, G. C.; JORGE, L.A. DE C. Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueira de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1503-1514, 2007.

DATNOFF, L. E.; SEEBOLD, K. W.; CORREA-V. F. J. The use of silicon for integrated disease management: reducing fungicide applications and enhancing host-plant resistance. Pg. 171-184. DATNOFF, L. E.; SNYDER, H.; KORNDORFER, G. H.; (ed) Elsevier Science, **Silicon in Agriculture**. 2001

DAWOOD, M.; CAO, F.; JAHANGIR, M. M.; ZHANG, G.; WU, F. Alleviation of aluminum toxicity by hydrogen sulfide is related to elevated ATPase, and suppressed aluminum uptake and oxidative stress in barley. **Journal of hazardous materials**, 209, 121-128, 2012.

DEMIDCHIK, V. Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology. **Environmental and Experimental Botany**, v.109, p. 212-228, 2015.

DORNELES, A. O. S.; PEREIRA, A. S.; ROSSATO, L. V.; POSSEBOM, G.; SASSO, V. M.; BERNARDY, K.; TABALDI, L. A. Silicon reduces aluminum content in tissues and ameliorates its toxic effects on potato plant growth. **Ciência Rural**, v.46, p.506-512, 2016.

EMAMVERDIAN, A.; DING, Y.; MOKHBERDORAN, F.; XIE, Y. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. **The Scientific World Journal**, 2015.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: (Ed.)Planta, 2007. 403 p.

FREITAS, L. B.; FERNANDES, D. M.; MAIA, S. C. M. Silicon on the mineral nutrition and aluminum accumulation in upland rice plants. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.45, p.440-448, 2015.

GAY, C.; COLLINS, J.; GEBICKI, J. M. Hydroperoxide assay with the ferric-xylenol orange complex. **Analytical Biochemistry**, v.273, p.149–155, 1999.

GIANNAKOULA, A.; MOUSTAKAS, M.; MYLONA, P.; PAPADAKIS, I.; YUPSANIS, T. Aluminum tolerance in maize is correlated with increased levels of mineral nutrients, carbohydrates and proline, and decreased levels of lipid peroxidation and Al accumulation. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v.165, n. 4, p.385-396, 2008.

GIANNAKOULA, A.; MOUSTAKAS, M.; SYROS, T.; YUPSANIS, T. Aluminum stress induces up-regulation of an efficient antioxidant system in the Al-tolerant maize line but not in the Al-sensitive line. **Environmental and Experimental Botany**, v.39, p.487–494, 2010.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v.48, p. 909-930, 2010.

GIONGO, V.; BOHNEN, H. Relação entre alumínio e silício em genótipos de milho resistente e sensível a toxidez de alumínio. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 3, p. 348-356, 2011.

GIRI, J. Glycinebetaine and abiotic stress tolerance in plants. **Plant signaling & behavior**, v. 6, p.1746-1751, 2011.

GRATÃO, P. L.; POLLE, A.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, v.32, n.6, p.481-494, 2005.

GRIEVE, C. M.; GRATTAN, S. R. Rapid assay for determination of water soluble quaternary ammonium compounds. **Plant and Soil**, The Hague, v. 70, p. 303-307, 1983.

GUERZONI, J. T. S.; BELINTANI, N. G.; MOREIRA, R. M. P.; HOSHINO, A. A.; DOMINGUES, D. S.; BESPALHOKFILHO, J. C.; VIEIRA, L. G. E. Stress-induced D1-pyrroline-5-carboxylate synthetase (P5CS) gene confers tolerance to salt stress in transgenic sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, Krakow, v. 36, p. 309–2319, 2014.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.32, p. 201-213, 2012.

GUO, T. R.; ZHANG G. P.; ZHOU M. X.; WU F. B.; CHEN J. X. Influence of aluminum and cadmium stresses on mineral nutrition and root exudates in two barley cultivars. **Pedosphere**, Nanjing, v. 17, n. 4, p. 505-512, 2007.

GUPTA, B.; HUANG, B. Mechanism of Salinity Tolerance in Plants: Physiological, Biochemical, and Molecular Characterization. **International Journal of Genomics**, v. 1, p. 1-18, 2014.

HAYAT, S.; HAYAT, Q.; ALYEMENI, M. N.; WANI, A. S.; PICHTEL, J.; AHMAD, A. Role of proline under changing environments: a review. **Plant signaling & behavior**, v.7, p.1456-1466, 2012.

HETHERINGTON, S.J.; ASHER, C.J.; BLAMEY, F.P.C. Comparative tolerance of sugarcane, navy bean, soybean and maize to aluminum toxicity. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.39, p.171-176, 1988.

HORST, W.J.; WANG, Y.; ETICHA, D. The role of the root apoplast in aluminium-induced inhibition of root elongation and in aluminium resistance of plants: **a review**. **Ann Bot** (Lond) 106: 185–197, 2010.

INOSTROZA-BLANCHETEAU, C.; RENGEL, Z.; ALBERDI, M.; DE LA LUZ MORA, M.; AQUEA, F.; ARCE-JOHNSON, P.; REYES-DÍAZ, M. Molecular and physiological strategies to increase aluminum resistance in plants. *Molecular biology reports*, v.39, n.3, p.2069-2079, 2012.

JOHANSEN D.A. *Plant Microtechnique*. **McGraw-Hill**, New York, 1940.

KUIJPER, J. De groei van blad schijf, blad scheede en stengel van het suikerriet. **Archief Suikerind**, Nederland, v. 23, p. 528-556, 1915.

LANA R.M.Q.; KORNDORFER G.H.; ZANÃO JÚNIOR L.A.; SILVA A.F.; LANA A.M.Q. Effect of calcium silicate on the productivity and silicon accumulation in the tomato plant. **Bioscience Journal**, v.19: p.15–20, 2003.

LANGE, A.; CARVALHO, J. L. N.; DAMIN, V.; CRUZ, J. C.; MARQUES, J. J. Alterações em atributos do solo decorrentes da aplicação de nitrogênio e palha em sistema de semeadura direta na cultura do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n.2, p.460-467, 2006.

LAWLOR, D. W. **Photosynthesis**. Third edition. New York: springer-Verlag, 2001. p. 79-115.

LEE, S. K.; SOHN, E. Y.; HAMAYUN, M.; YOON, J. Y.; LEE, I. J. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. **Agroforest Systems**, v.80, p.333–340, 2010.

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

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in enzymology**, v.148, p.350-382, 1987.

LIMA FILHO, O. F. O silício é um fortificante e antiestressante natural para as plantas. **Embrapa Agropecuaria Oeste** 2011. Disponível em <<http://www.silifertil.com.br/artigos/silico02.pdf>>, ultimo acesso em 25 de julho de 2016.

LIMA, M. D. R.; BARROS JR, U. O.; BARBOSA, M. A. M.; SEGURA, F. R.; SILVA, F. F.; BATISTA, B. L.; LOBATO, A. K. S. Silicon mitigates oxidative stress and has positive effects in *Eucalyptus platyphylla* under aluminium toxicity. **Plant Soil Environ**, v.62, p.164-170, 2016.

LOBATO, A.K.S.; LUZ, L.M.; COSTA, R.C.L.; SANTOS FILHO, B.G.; MEIRELLES, A.C.S.; OLIVEIRA NETO, C.F.; LAUGHINGHOUSE, H.D.; NETO, M.A.M.; ALVES, G.A.R.; LOPES, M.J.S.; NEVES, H.K.B. Silicon Exercises Influence on Nitrogen Components in Pepper Subjected to Water Deficit. **Research Journal of Biological Sciences**, v.4, p.1048-1055, 2009.

MA, J. F.; CHEN, Z. C.; SHEN, R. F. Molecular mechanisms of Al tolerance in gramineous plants. **Plant and Soil**, v. 381, n. 1-2, p. 1-12, 2014.

MAGHSOUDI, K.; EMAM, Y.; PESSARAKLI, M. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v.39, n.7, p.1001-1015, 2016.

MAJEROWICZ, N. Fotossíntese. In: KERBAUY, G. B. (Ed.). **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. Cap.5, p. 82-133.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Agronomica Ceres 638 p.2006.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar: expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 55 p. 2009.

MARIJUAN M. P.; BOSCH M. S. Ecophysiology of invasive plants: Osmotic adjustment and antioxidants. **Trends Plant Sci**, v.18, p.660–666, 2013.

MARIN, A.; SANTOS, D. M. M. Interação da deficiência hídrica e da toxicidade do alumínio em guandu cultivado em hidroponia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 10, p. 1267-1275, 2008.

MATSUMOTO, H.; MOTODA, H. Aluminum toxicity recovery processes in root apices. Possible association with oxidative stress. **Plant science**, v.185, p.1-8, 2012. Matsumoto, H.; Motoda, H. Oxidative stress is associated with aluminum toxicity recovery in apex of pea root. **Plant and soil**, v. 363, n.1-2, p.399-410, 2013.

MISHRA, P.; DUBEY, R. S. Nickel and Al-excess inhibit nitrate reductase but upregulate activities of aminating glutamate dehydrogenase and aminotransferases in growing rice seedlings. **Plant Growth Regulation**, v. 64, n. 3, p. 251-261, 2011.

MOLINARI H. B. C.; MARUR C. J.; DAROS E., DE CAMPOS M. K. F.; DE CARVALHO J.; BESPALHOK J. C. Evaluation of the stress-inducible production of

proline in transgenic sugarcane (*Saccharum spp.*): osmotic adjustment, chlorophyll fluorescence and oxidative stress. **Physiol. Plant**, v. 130, p.218–229, 2007.

MÔRO, F. V. **Tolerância de genótipos de milho (*Zeamaiz* L.) ao herbicida nicosulfuron**. 2000. 88 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2000.

MOTA, J. A.; SILVA, J. L. S.; SOUZA, L. C.; SILVA, J. N.; COELHO, C. C. R.; NEVES, M. G.; OLIVEIRA NETO, C. F.; CONCEIÇÃO, H. E. O.; MARIANO, D. C.; OKUMURA, R. S. Osmoprotectors in maize (*Zea mays*) under the effect of water availability and silicon levels in soil. **Journal: Food, Agriculture and Environment**, v.13, p.291-296, 2015.

NAVASCUÉS, J.; PÉREZ-RONTOMÉ, C.; SÁNCHEZ, D. H.; STAUDINGER, C.; WIENKOOP, S.; RELLÁN-ÁLVAREZ, R.; BECANA, M. Oxidative stress is a consequence, not a cause, of aluminum toxicity in the forage legume *Lotus corniculatus*. **New Phytologist**, v.193, p.625-636, 2012.

NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental Plant physiology**. Oxford: Academic Press, 2009. p. 229-275.

NOGUEIROL, R. C.; MONTEIRO, F. A.; GRATÃO, P. L.; BORGIO, L.; AZEVEDO, R. A. Tropical soils with high aluminum concentrations cause oxidative stress in two tomato genotypes. **Environmental monitoring and assessment**, v.187, p.1-16, 2015.

PEI, Z. F.; MING, D. F.; LIU, D.; WAN, G. L.; GENG, X. X.; GONG, H. J.; ZHOU, W. J. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.29, p.106-115, 2010.

PETROV, V.; HILLE, J.; MUELLER-ROEBER, B.; GECHEV, T. S. ROS-mediated abiotic stress-induced program med cell death in plants. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 6, p. 1-16, 2015.

PINTÓ-MARIJUAN, M.; MUNNÉ-BOSCH, S. Ecophysiology of invasive plants: osmotic adjustment and antioxidants. **Trends in plant science**, v.18, n.12, p.660-666, 2013.

PLAŽEK, A., TATRZAŃSKA, M., MACIEJEWSKI, M., KOŚCIELNIAK, J., GONDEK, K., BOJARCZUK, J., DUBERT, F. Investigation of the salt tolerance of new Polish bread and durum wheat cultivars. **Acta Physiologiae Plantarum**, Krakow, v. 35, n. 8, p. 2513-2523, 2013.

REJEB, K. B.; ABDELLY, C.; SAVOURÉ, A. How reactive oxygen species and proline face stress together. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.80, p.278-284, 2014.

RIBA, X. F. **Poliaminas y tolerancia al aluminio en variedades tolerantes y sensibles de *Zea mays***. 2001. 148 f. Tese (Covtoral em Ciències) – Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, 2001.

RIBEIRO, N. V.; FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C. Padrões e impactos ambientais da expansão atual do cultivo da cana-de-açúcar: uma proposta para o seu ordenamento no bioma Cerrado. **Ateliê Geográfico**, v.9, p.99-113, 2015.

RIZWAN, M.; ALI, S.; IBRAHIM, M.; FARID, M.; ADREES, M.; BHARWANA, S. A.; ABBAS, F. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v.22, p.15416-15431, 2015.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F. Nutrição e adubação de cana-de-açúcar: indagações e reflexões. **Encarte Informação Agronomias Potafos**, n.110, p.6-11, 2005.

ROSSIELLO, R. O. P.; JACOB NETTO, J. Toxidez de alumínio em plantas: Novos enfoques para um velho problema. L. Fernandes, M.S (Ed). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2006. P. 375-488.

ROUT, G.; SAMANTARAY, S.; DAS, P. Aluminium toxicity in plants: a review. **Agronomie**, v. 21, n. 1, p. 3-21, 2001.

SADE, H.; MERIGA, B.; SURAPU, V.; GADI, J.; SUNITA, M. S. L.; SURAVAJHALA, P.; KISHOR, P. K. Toxicity and tolerance of aluminum in plants: tailoring plants to suit to acid soils. **Biometals**, v.29, n.2, p.187-210, 2016.

ŠČANČAR, J.; MILAČIČ, R. Aluminium speciation in environmental samples: a review. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, Heidelberg, v. 386, n. 4, p. 999-1012, 2006.

SHAHID, M. A.; BALAL, R. M.; PERVEZ, M. A.; ABBAS, T.; AQUEEL, M. A.; JAVAID, M. M.; GARCIA-SANCHEZ, F. Foliar spray of phyto-extracts supplemented with silicon: an efficacious strategy to alleviate the salinity-induced deleterious effects in pea (*Pisum sativum* L.). **Turkish Journal of Botany**, v.39, p.408-419, 2015.

SHAHNAZ, G.; SHEKOOFEH, E.; KOUROSH, D.; MOOHAMADBAGHER, B. Interactive effects of silicon and aluminum on the malondialdehyde (MDA), proline, protein and phenolic compounds in *Borago officinalis* L. **Journal of Medicinal Plants Research**, v. 5, n. 24, p. 5818-5827, 2011.

SHARMA, P.; DUBEY, R. S. Involvement of oxidative stress and role of antioxidative defense system in growing rice seedlings exposed to toxic concentrations of aluminum. **Plant cell reports**, v.26, n.11, p.2027-2038, 2007.

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, v. 2012, 26 p, 2012.

SHARMA, R.; BHARDWAJ, R.; THUKRAL, A. K.; HANDA, N.; KAUR, R.; KUMAR, V. Osmolyte Dynamics: New Strategies for Crop Tolerance to Abiotic Stress Signals. In: AHMAD, P.; RASOOL, S. (Eds): **Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance**, v.2, p.405-430, 2014.

SILVA, O. N.; LOBATO, A. K. S.; ÁVILA, F. W.; COSTA, R. C. L.; OLIVEIRA NETO, C. F.; SANTOS FILHO, B. G.; CARDOSO, M. S. Silicon-induced increase in chlorophyll is modulated by the leaf water potential in two water-deficient tomato cultivars. **Plant Soil Environ**, v.58, p.481-486, 2012.

SILVA, S. Aluminium toxicity targets in plants. **Journal of Botany**, v. 2012, p.1-8, 2012.

SILVEIRA, J. A. G.; VIÉGAS, R. A.; ROCHA, I. M. A.; MOREIRA, A. C. O. M.; MOREIRA, R. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Proline accumulation and glutamine synthetase activity are increased by salt-induced proteolysis in cashew leaves. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v.160, p.115-123, 2003.

SINGH, V. P.; TRIPATHI, D. K.; KUMAR, D.; CHAUHAN, D. K. Influence of exogenous silicon addition on aluminium tolerance in rice seedlings. **Biological trace element research**, v. 144, n.1-3, p.1260-1274, 2011.

SOUSA P. L.; DO CARMO S. B.; DE PINHO, W. C. S.; BARBOSA, M. A. M.; SILVA GUEDES-LOBATO, E. M.; SEGURA, F. R.; DA SILVA L., A. K. Silicon (Si) ameliorates the gas exchange and reduces negative impacts on photosynthetic pigments in maize plants under Zinc (Zn) toxicity. **Australian Journal of Crop Science**, v.9, n.10, p.901, 2015.

STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; do CANTO, M. W.; HECKTHEUER, L. H. H.; As clorofilas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 748-755, 2005.

SUPRASANNA, P.; NIKALJE, G.C.; RAI, A.N. Osmolyte accumulation and implications in plant abiotic stress tolerance. In Osmolytes and plants acclimation to changing environment: emerging omics technologies; IQBAL, N., NAZAR, R., KHAN, N.A. (Ed). **Springer**, p.1–12, 2016.

SZÁBADOS, L.; KOVÁCS, H.; ZILBESTEIN, A.; BOUCHEREAU, A. Plants in extreme environments: importance of protective compounds in stress tolerance. **Advances in Botanical Research**, v.57, p.106-133, 2011.

TABALDI, L. A.; CARGNELUTTI, D.; GONÇALVES, J. F.; PEREIRA, L. B.; CASTRO, G. Y.; MALDANER, J.; NICOLOSO, F. T. Oxidative stress is an early symptom

triggered by aluminum in Al-sensitive potato plantlets. **Chemosphere**, v.76, p.1402-1409, 2009.

TAHARA, K.; YAMANOSHITA, T.; NORISADA, M.; HASEGAWA, I.; KASHIMA, H.; SASAKI, S.; KOJIMA, K. Aluminum distribution and reactive oxygen species accumulation in root tips of two *Melaleuca* trees differing in aluminum resistance, **Plant Soil**, v.307, p.167–178, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. In: **Respostas e adaptações ao estresse abiótico**. Porto Alegre: Artmed, 2013, cap.26, p. 753-780.

TUNA, A. L.; KAYA, C.; HIGGS, D.; MURILLO-AMADOR, B.; AYDEMIR, S.; GIRGIN, A. R. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. **Environmental and Experimental Botany**, v.62, p.10-16, 2008.

TUTEJA, N. Mechanisms of high salinity tolerance in plants. **Methods in Enzymology**, New York, v. 428, p. 419-438, 2007.

VACULÍKOVÁ, M.; VACULÍK, M.; TANDY, S.; LUXOVÁ, M.; SCHULIN, R. Alleviation of antimonate (SbV) toxicity in maize by silicon (Si). **Environmental and Experimental Botany**, v.128, p.11-17, 2016.

VASANTHI, N.; SALEENA, L. M.; RAJ, S. A. Silicon in crop production and crop protection-A review. **Agricultural Reviews**, v.35, n.1, p.14-23, 2014.

WANG, Y.X.; STASS, A.; HORST, W.J. Apoplastic binding of aluminium is involved in silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in maize. **Plant Physiology** v.136, p.3762–3770, 2004.

WANI, H. S.; SINGH, B. N.; HARIBHUSHAN, A.; MIR, I. J. Compatible solute engineering in plants for abiotic stress tolerance-role of glycine betaine. **Current genomics**, v.14, p.157-165, 2013.

YIN, L.; WANG, S.; LI, J.; TANAKA, K.; OKA, M. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.35, p.3099–3107, 2013.