

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO E EXCESSO DE AMÔNIO E DE NITRATO EM
PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE PEPINO**

Cid Naudi Silva Campos

Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL - SÃO PAULO - BRASIL

JULHO DE 2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO E EXCESSO DE AMÔNIO E DE NITRATO EM
PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE PEPINO**

Cid Naudi Silva Campos

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

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 (Ciência do Solo).

JABOTICABAL - SÃO PAULO - BRASIL

JULHO DE 2013

C198s Campos, Cid Naudi Silva
Sílicio e excesso de amônio e de nitrato em plantas de cana-de-açúcar e de pepino / Cid Naudi Silva Campos. – Jaboticabal, 2013
xi, 60 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013
Orientador: Renato de Mello Prado
Banca examinadora: Leônides Castellanos Gonzáles, Rogério
Falleiros Carvalho
Bibliografia

1. *Saccharum spp.* 2. *Cucumis sativus.* 3. Nitrogênio. I. Título. II.
Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.811:633.61

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



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: SILÍCIO E EXCESSO DE AMÔNIO E DE NITRATO EM PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE PEPINO

AUTOR: CID NAUDI SILVA CAMPOS

ORIENTADOR: Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ROGERIO FALLEIROS CARVALHO

Departamento de Biologia Aplicada À Agropecuária / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. LEONIDES CASTELLANOS GONZALEZ

Universidad de Cienfuegos / Cuba

Data da realização: 29 de julho de 2013.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

CID NAUDI SILVA CAMPOS – nascido em Franca, São Paulo, aos 13 dias do mês de abril de 1988, filho de Regina Célia Silva e Aparecido de Campos. Graduado em Engenharia Agrônômica, pela Universidade do Estado de Minas Gerais - Câmpus Passos, Fesp-UEMG. Durante a graduação foi bolsista de Iniciação Científica pelo programa da UEMG/PIBIC/PAPQ. Foi estagiário bolsista no Geapassos (Grupo de Estudos e Prática do Agronegócio), no IAC - Instituto Agrônômico de Campinas, (Centro de fertilidade do solo) e membro do Centro Acadêmico Estudantil do Curso de Engenharia Agrônômica de Passos-MG. Realizou mais de 3.200 horas de estágio e mais de 800 horas de treinamentos e cursos. Em agosto de 2011 ingressou no curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Câmpus de Jaboticabal, sendo bolsista da CAPES por 24 meses. Participou de várias atividades e projetos na área de Nutrição de Plantas, atualmente é membro do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas, GENPLANT/FCAV-UNESP.

“A humildade nos faz sábios, ela é o primeiro degrau da sabedoria”.

São Tomás de Aquino.

À minha querida e amada mãe Regina Célia Silva, por dedicar sua vida à minha e pelo exemplo de ser humano.

Ao padrinho Jackson e a madrinha Maria, pelos cuidados durante toda minha vida.

À Tia Cláudia pela inspiração e conselhos.

Ao avô Vicente (in memoriam) e a avó Jeronima por sua sabedoria e humildade.

Ao Mestre Vander Ferreira pelos ensinamentos de vida.

Aos meus familiares e amigos pela confiança e apoio.

Ofereço e Dedico

AGRADECIMENTOS

A **Santíssima Trindade** por estar sempre ao meu lado, me iluminando e me guiando pelos caminhos da vida, concedendo-me sempre, proteção e amparo.

À mãe dos céus Maria e aos santos protetores São Bento, São Miguel Arcanjo e São Francisco de Assis, pela intercessão divina e a proteção concedida.

À minha grande inspiração Regina Célia Silva (mãe e pai) pela compreensão, apoio e pelos ensinamentos de vida que tanto me fortaleceram como pessoa, me ensinando sempre a trilhar no caminho do bem.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado pela confiança, conselhos, ensinamentos, oportunidades dadas e auxílio em todo o decorrer do meu curso de mestrado, agradeço pela valiosa orientação.

Aos professores(as) Miguel Ângelo Mutton, Rogério Falleiros Carvalho, Arthur Bernardes Cecílio Filho, Leónides Castellanos Gonzáles, Mara Cristina Pessôa da Cruz e Durvalina Maria Mathias dos Santos, pelos ensinamentos e contribuições a este trabalho.

À minha família, tios, tias, padrinho, madrinha, irmã, afilhada, pai, avó, primos (em especial Guilherme Henrique, irmão de república) e primas, pelo convívio e afeto doados.

À Rebeca Rios pela compreensão, amizade, apoio e, acima de tudo, pelo amor.

Aos amigos da pós-graduação Gustavo Caione, Edson dos Santos, Antonio João de Lima Neto, Márcio e Fábio Mingotte por todos os auxílios na execução deste trabalho e durante todo o curso de mestrado.

Aos irmãos do grupo de oração universitário (GOU-Unesp), Leandro, Bruno, Gilson, Érica, Elisamara e o padre Edson, pelos momentos vividos e orações partilhadas.

Aos meus amigos que ficaram pelo mundo, Vander Ferreira, João Paulo Martins, Suzy, Silvia, Letícia Moroti, Estevão Vicari Mellis, Thúlio de Andrade, Renan Silva, Thais Sanches, Guilherme Loureiro, Leonardo Dias, André Bombonato,

Gustavo Caione, Adenilson, Thales Lemos, Roberlei, Rhuan e João Vieira, pelos ensinamentos, amizade e companheirismo.

À Helenice, ao Matheus Barbosa e as irmãs carmelitas de Jaboticabal, pelas orações e palavras amigas.

Ao meu avó materno, Vicente Honório da Silva (*in memoriam*) por sua sabedoria, que hoje consigo entender.

Aos meus colegas do Genplant, pelos trabalhos desenvolvidos em equipe.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista pela oportunidade de aprendizado.

À todo o corpo docente e técnicos da Universidade Estadual Paulista pela contribuição com a minha formação.

Muito obrigado.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Nitrogênio: toxicidade de amônio e excesso de nitrato	3
2.2 Fertilização com nitrato e amônio em espécies de plantas	5
2.3 Efeitos do excesso de amônio e de nitrato em espécies de plantas	6
2.4 Excesso de amônio e de nitrato em plantas de cana-de-açúcar e de pepino	8
2.5 Fatores que podem aliviar estresse por excesso de N em plantas	9
2.6 Silício nas plantas	10
2.7 Uso do Si na mitigação de estresses por desordens nutricionais em plantas.....	11
2.8 Interação do Si com excesso de N.....	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Experimento com plantas de cana-de-açúcar	14
3.1.1 Avaliações do experimento com plantas de cana-açúcar.....	15
3.2 Experimento com plantas de pepino	17
3.2.1 Avaliações do experimento com plantas de pepino	19
3.3 Análise dos resultados	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1. Experimento com plantas de cana-de-açúcar	20
4.1.1. Acúmulo de N e de Si	20
4.1.2. Crescimento de plantas de cana-de-açúcar	23
4.1.3. Variáveis fisiológicas e atividade da redutase do nitrato	30
4.2. Experimento com plantas de pepino	34
4.2.1. Acúmulo de N e de Si.....	34
4.2.2. Crescimento de plantas de pepino	36
4.2.3. Variáveis fisiológicas, morfológica e atividade da redutase do nitrato. 43	
5. CONCLUSÕES	46
6. REFERÊNCIAS	47
APÊNDICES	56

SILÍCIO E EXCESSO DE AMÔNIO E DE NITRATO EM PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE PEPINO

RESUMO - O nitrogênio em excesso está associado a distúrbios fisiológicos em plantas; entretanto, esses estresses poderiam ser minimizados com o uso do silício. Objetivou-se avaliar a relação do silício com excesso de amônio e de nitrato em duas variedades de cana-de-açúcar (RB 85-5156 e CTC 05) e de pepino (Tsubasa e Hokushin) e seus reflexos no crescimento e na fisiologia das plantas. Realizaram-se dois experimentos em cultivo hidropônico, o experimento I com plantas de cana-de-açúcar e o experimento II com plantas de pepino. Em ambos utilizou-se delineamento inteiramente casualizado e quatro repetições, em esquema fatorial 2 x 3 x 2, sendo duas fontes de N (nitríca e amoniacal) na concentração de 60 mmol L⁻¹ para o experimento I, e 10 mmol L⁻¹ para o experimento II, três concentrações de silício (0; 1 e 10 mmol L⁻¹) e duas variedades de cana-de-açúcar (RB 85-5156 e CTC 05) e de pepino (Tsubasa e Hokushin). Aos 35 dias após a aplicação dos tratamentos no experimento I e aos 28 dias após a aplicação dos tratamentos no experimento II, foram realizadas avaliações de crescimento da planta, acúmulo de silício e de nitrogênio na parte aérea e nas raízes e em variáveis fisiológicas (transpiração, condutância estomática e fotossíntese), o mesmo para atividade da enzima redutase do nitrato nos tratamentos com a fonte de N nitríca. Com a fonte de N amoniacal, o Si promoveu aumento nas variáveis de crescimento e fisiológicas; entretanto, com a fonte de N nitríca, não apresentou estes efeitos. O uso do Si, em ambas as variedades de cana-de-açúcar e de pepino, mitigou a toxicidade de amônio proporcionando maiores acúmulos de matéria seca de plantas; entretanto não beneficiou as plantas sob excesso de N nitríco.

Palavras-chave: *Saccharum spp.*, *Cucumis sativus*, desordem nutricional, elemento benéfico, nitrogênio

SILICON AND EXCESS OF AMMONIUM AND NITRATE IN SUGARCANE AND CUCUMBER PLANTS

ABSTRACT - The excess of nitrogen is associated with physiological disorders in plants, however, these stresses could be minimized with the use of silicon. This study aimed to assess the relationship of silicon with excess of ammonium and nitrate in two varieties of sugarcane (RB 85-5156 and CTC 05) and cucumber (Tsubasa and Hokushin) and its effects on growth and physiology of plants. There were two experiments in hydroponics, the experiment I with sugarcane plants and experiment II with cucumber plants, in both with a completely randomized design with four replications in a factorial 2 x 3 x 2 with two N sources (nitrate and ammonium) at a concentration of 60 mmol L⁻¹ for experiment I and 10 mmol L⁻¹ for the experiment II, three concentrations of silicon (0, 1 and 10 mmol L⁻¹) and two varieties of sugarcane (RB 85-5156 and CTC 05) and cucumber (Tsubasa and Hokushin). 35 days after application the treatments in experiment I and 28 days after application of the treatments in experiment II, were evaluated plant growth, accumulation of silicon and nitrogen in shoots and roots and physiological variables (transpiration, stomatal conductance and photosynthesis), the same as activity of nitrate reductase in the treatment with nitrate source. With the source of ammonium, Si promoted an increase in growth and physiological variables, however, with the source of nitrate, did not show these effects. The use of Si in both varieties of sugarcane and cucumber, mitigated the toxicity of ammonium provided higher accumulation of dry matter in plants, however did not benefit plants under excess of nitrate.

Keywords: *Saccharum spp.*, *Cucumis sativus*, nutritional disorder, beneficial element, nitrogen

1. INTRODUÇÃO

A forma de absorção do nitrogênio (N) (amoniacoal ou nítrico), influencia em vários processos fisiológicos e bioquímicos das plantas, como fotossíntese e atividades enzimáticas do metabolismo do N (LASA et al., 2002; CRUZ et al., 2011; BORGOGNONE et al., 2013), no desenvolvimento e na morfologia (ZHU et al., 2000), variando com a espécie e variedade do vegetal (LASA et al., 2002).

A crescente busca por altas produtividades exige a utilização de maiores quantidades de insumos agrícolas, especialmente aplicações de altas doses de fertilizantes nitrogenados. Embora na maioria dos solos haja predominância do nitrogênio na forma nítrica, em alguns solos, a forma amoniacoal pode apresentar-se em maiores quantidades (LASA et al., 2002).

Um aspecto importante seria a toxicidade que o excesso de N amoniacoal causa nas plantas, como alterações no pH intracelular, no equilíbrio osmótico, no metabolismo de fitormônios e de poliaminas, induz a deficiência de nutrientes minerais (GERENDAS et al., 1997), aumento no conteúdo de O_2 e H_2O_2 , induzindo o estresse oxidativo, menores teores de clorofila (a+b) e de carotenóides (WANG et al., 2010), menores taxas fotossintéticas (SU et al., 2012; BORGOGNONE et al., 2013), ocasionando diminuição do crescimento, clorose e necrose foliar, coloração marrom do sistema radicular e do caule (WONG, 2005).

Em condição de excesso de N nítrico, a maioria das plantas, possuem o mecanismo de acumulação do nitrato nos vacúolos (SILVEIRA; CROCOMO, 1990), não ocasionando sintomas de toxicidade (LASA et al., 2001; LASA et al., 2002). No entanto, seu acúmulo nos vegetais e o consumo induz danos aos humanos e animais (SANTAMARIA, 2006).

As espécies de plantas apresentam diferentes tolerâncias ao excesso de N (HORCHANI; HAJRI; ASCHI-SMITI, 2011) e também entre as variedades (SCHORTEMAYER; STAMP; FEIL, 1997; CRUZ et al., 2011). Há indicações de plantas mais sensíveis ao excesso de N (amoniacoal e nítrico), como o pepino (*Cucumis sativus*) (ROOSTA et al., 2009) e outras tolerantes, como a cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) (ISHIKAWA et al., 2009); no entanto, mesmo espécies

tolerantes podem apresentar sintomas de toxicidade, dependendo das concentrações de N (BRITTO; KRONZUCKER, 2002).

Contudo, para aliviar estresses em plantas, tem-se opção de selecionar genótipos tolerantes e também pode-se usar elementos benéficos, como o silício (Si). O estresse por alta dose de N pode ser diminuído ou atenuado com uso do Si (MA; YAMAJI, 2006), espera-se maior destaque em plantas acumuladoras de Si como a cana-de-açúcar (SAVANT, 1999) e o pepino (LIANG et al., 2005).

O Si apresenta importância para as plantas na amenização dos estresses (MATEOS-NARANJO; ANDRADES-MORENO; DAVY, 2013), causados por toxicidade, seja por excesso de nutrientes e/ou por metais pesados, como boro (GUNES et al., 2007), alumínio (PRABAGAR; HODSON; EVANS, 2011), cádmio (FENG et al., 2010) e cromo (ALI et al., 2013), devido a seu envolvimento com atividades metabólicas, fisiológicas e estruturais dos vegetais (SHEN et al., 2010), estimulando sistemas antioxidantes, atuando na complexação, coprecipitação ou imobilização com íons tóxicos (LIANG et al., 2007).

O Si promove aumento nas taxas fotossintéticas de plantas sob condições de estresse (BYBORDI, 2012; ALI et al., 2013; MATEOS-NARANJO; ANDRADES-MORENO; DAVY, 2013; SHI et al., 2013). Este efeito pode ser relacionado ao aumento da rigidez dos tecidos e à resistência mecânica das células, tornando as folhas com melhor arquitetura (LIMA et al., 2011), com os efeitos protetores aos mecanismos fotossintéticos, maior eficiência do uso da água e no equilíbrio dos nutrientes minerais (MATEOS-NARANJO; ANDRADES-MORENO; DAVY, 2013) ou ainda, devido ao aumento da atividade antioxidante, reduzindo a peroxidação lipídica das folhas, protegendo-as e mantendo maiores áreas fotossintéticas (JIAO-JING et al., 2009).

Em um trabalho de revisão sobre o uso do Si na melhoria da resistência a estresses (MA, 2004). O autor relatou que o Si contribui para o desenvolvimento de plantas em condições de excesso de N, no entanto, não ressaltou a forma do N (amoniacoal ou nítrica).

Portanto, estudos envolvendo silício e o excesso de amônio e de nítrato, ainda são incipientes na literatura, havendo a necessidade de ampliar as pesquisas nesta área. Diante disso a hipótese do trabalho foi (a) o uso do Si pode mitigar os

efeitos do excesso de N na forma amoniacal e nítrica; (b) os efeitos benéficos do Si na mitigação do excesso de N pode ser influenciado pela espécie ou variedade.

Objetivou-se avaliar a relação do silício com excesso de amônio e de nitrato em duas variedades de cana-de-açúcar e de pepino e seus reflexos no crescimento e na fisiologia das plantas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Nitrogênio: toxicidade de amônio e excesso de nitrato

As formas predominantes de nitrogênio disponível para as plantas são os íons de amônio e de nitrato. As espécies de plantas têm a capacidade de utilizar das duas formas de nitrogênio (SILVA; COUTO; SANTOS, 2010; CRUZ et al., 2011). Embora na maioria dos solos haja predominância do nitrogênio na forma nítrica, em alguns a forma amoniacal pode apresentar-se em maiores quantidades (LASA et al, 2002).

No entanto, a forma de absorção, amoniacal ou nítrica, influencia no desenvolvimento e morfologia (ZHU et al., 2000) e nos processos bioquímicos e fisiológicos dos vegetais (CRUZ et al., 2011), variando de acordo com a espécie e cultivar (LASA et al., 2002) e com fatores relacionados ao ambiente, como: irradiância, temperatura, concentração de N e o valor pH (KONNERUP; BRIX, 2010).

A absorção de N na forma nítrica requer processos de redução para posterior incorporação em compostos orgânicos, de forma que o nitrato é reduzido a nitrito pela nitrato redutase, e o nitrito a amônia pela nitrito redutase, este processo consome grande quantidade de energia, carbono e prótons (BUCHANAN; GRUISSEM; JONES, 2000).

As altas concentrações de nitrato contaminam águas superficiais e lençóis freáticos devido sua alta mobilidade nos solos (SCHORTEMAYER; FEIL; STAMP, 1993), Entretanto, o excesso de nitrato é tolerável pela maioria das plantas, pois seus íons são acumulados nos vacúolos, não apresentando sintomas de toxicidade às plantas, podendo até desempenhar funções osmóticas (LASA et al., 2001 e

2002). A acumulação desta forma de N nos vegetais ocasiona danos aos humanos e aos animais que os consumirem (SANTAMARIA, 2006).

A absorção de N na forma amoniacal pode ter como vantagem o N estar na forma reduzida, no entanto o fluxo de amônio é de difícil controle, devido à necessidade da homeostase celular do elemento, pelo fato do excesso dessa forma induzir a toxicidade aos vegetais (LOQUE et al., 2004).

A maioria das plantas superiores desenvolvem sintomas tóxicos graves, quando cultivada apenas com amônio. Recentemente, a toxicidade de amônio tem sido apontada como uma causa do declínio de florestas e até mesmo extinção de espécies vegetais (BRITTO et al., 2001).

A toxicidade de amônio ocasiona mudanças bioquímicas e fisiológicas na planta, como: alterações no pH intracelular, no equilíbrio osmótico, no metabolismo de fitormônios e de poliaminas e induz a deficiência de nutrientes (GERENDAS et al., 1997), aumento no conteúdo de O_2 e H_2O_2 , induzindo o estresse oxidativo e menores teores de clorofila (a+b) e de carotenóides (WANG et al., 2010), menores taxas fotossintéticas, condutância estomática e transpiração (LOPES; ARAUS, 2006; SU et al., 2012; BORGOGNONE et al., 2013), aumento na síntese de etileno (BRITTO; KRONZUCKER, 2002).

Os sintomas de toxicidade causados por excesso de N são relatados por Wong (2005), como plantas raquíticas, com maior formação de gemas vegetativas em vez de reprodutivas.

Entretanto destaca-se os sintomas com excesso de amônio, que causa em certos vegetais, como: clorose, necrose, atrofiamento e murcha das folhas, coloração marrom do sistema radicular e do caule, apresentando sinais de senescência (GERENDAS et al., 1997; ZHU et al., 2000; LOQUE et al., 2004; WONG, 2005; NEUBERG et al., 2010), crescimento reduzido das plantas, raízes curtas e atrofiadas, e em casos de toxicidade severa, raízes e talos ficam com aspecto insalubre e apresentam podridão, podendo ocorrer morte do vegetal (WONG, 2005; ROOSTA; SCHJOERRING, 2007; JAMPEETONG; BRIX, 2009; JAMPEETONG; BRIX; KANTAWANICHKUL, 2012).

Outro aspecto importante seria que, com a maior aplicação de amônio, os tecidos das plantas ficam com maior suculência e há menor síntese de fitoalexinas,

além de diluir o teor de silício na planta, favorecendo a penetração de agentes externos como patógenos (MALAVOLTA, 2006).

As respostas que as plantas apresentam quando absorvem amônio são muito amplas, mesmo sendo da mesma espécie, de maneira que há diferenças entre as variedades quanto ao comportamento de plantas sob estresse por amônio (CRUZ et al., 2011).

2.2 Fertilização com nitrato e amônio em espécies de plantas

As formas de N (nitrato ou amoniacal) influenciam no crescimento das plantas de um modo distinto, de maneira que as espécies de plantas apresentam diferentes tolerâncias ao excesso de N (HORCHANI; HAJRI; ASCHI-SMITI, 2011).

Em estudos com plantas de espinafre (*Spinacia oleracea*) e ervilha (*Pisum sativum*) cultivadas com amônio e nitrato sob concentrações de 1,5 e 3 mmol, Domínguez-Valdivia et al. (2008) relataram que, as respostas das plantas à nutrição amoniacal são distintas, sendo que, plantas de espinafre cultivadas sob amônio apresentaram redução no crescimento, em relação as cultivadas com nitrato, entretanto, o mesmo não foi verificado para as plantas de ervilha.

Avaliando os efeitos de fontes de N (nitrato e amoniacal) sobre variáveis fisiológicas e bioquímicas de plantas de *Cana indica*, Konnerup e Brix (2010) concluíram que, esta planta, apresentou maiores taxas fotossintéticas quando aplicou-se a fonte de N amoniacal, sugerindo uma tolerância e preferência a esta fonte de N.

Borgognone et al. (2013), em estudos com plantas de tomateiro e concentrações de nitrato e de amônio, verificaram nas plantas com predominância do N amoniacal, menores teores de Ca e de Mg, redução na fotossíntese e no crescimento.

Em estudos com diferentes proporções de N (nitrato e amoniacal) na nutrição de plantas de girassol; Silva, Couto e Santos (2010) notaram que, as plantas cultivadas com a maior proporção de N amoniacal, apresentaram redução na matéria seca, no comprimento e no volume de raiz e no teor de clorofila, em relação as plantas que foram cultivadas com maior proporção de nitrato.

Avaliando o efeito de fontes de N (níttrica e amoniacal) em plantas de trigo, Lopes e Araus (2006) relataram que, no tratamento com amônio (11 mmol), houve menores taxas fotossintéticas em relação à fonte níttrica, fato atribuído, a menor condutância estomática ocorrida nas plantas sob N amoniacal.

Neste contexto, Lopes e Araus (2008) estudaram diferenças fisiológicas em plantas de cevada, sob fontes de N (amoniacal e níttrica). Os autores verificaram que sob N amoniacal promoveu diminuição da fotossíntese e do crescimento das plantas.

2.3 Efeitos do excesso de amônio e de nitrato em espécies de plantas

Realizou-se estudo sobre o efeito da aplicação de nitrato (0 a 0,60 g kg⁻¹ de N) no crescimento, acúmulo e na atividade da redutase do nitrato em plantas de colza, couve chinesa e espinafre (CHEN et al., 2004). Os autores observaram que o acúmulo de nitrato nas plantas aumentaram conforme o fornecimento, e que houve redução do crescimento das plantas com doses acima de 0,45 g kg⁻¹ de N e à atividade da redutase do nitrato não aumentou com elevadas concentrações de nitrato.

Avaliando plantas de feijão sob toxicidade por amônio, Zhu et al. (2000), relataram que as folhas ficaram atrofiadas e com cloroses. Os autores verificaram ainda, aumento na peroxidação lipídica, indicando que sob o excesso de amônio plantas fazem uso de vias metabólicas com maiores formações de radicais livres.

Jampeetong, Brix e Kantawanichkul (2012) realizaram estudo com plantas de *Salvinia cucullata* sob concentrações de amônio (0,5 a 15 mmol). Os autores observaram que concentrações acima de 5 mmol de amônio, induziu o aparecimento de cloroses foliares e redução do crescimento da parte aérea e das raízes, associado aos menores teores de clorofilas, carotenóides e de K nos tecidos do vegetal.

Wang et al. (2010) notaram que após a exposição das plantas de *Hydrilla verticillata* ao amônio (3 mmol) proporcionou aumento no conteúdo de O₂ e H₂O₂ nas folhas das plantas testadas, induzindo o estresse oxidativo, no entanto, aumentou a atividade das enzimas superóxido dismutase, peroxidase e catalase. Os autores

sugerem que essa espécie apresenta um mecanismo de adaptação ao estresse por amônio, através de sistemas antioxidantes.

Sánchez et al. (2004) em estudos sobre efeitos no metabolismo de plantas de feijão verde sob altas concentrações (6 a 24 mmol) de N ($\text{NH}_4^+ \text{NO}_3^-$), relataram que as atividades enzimáticas do metabolismo do N (nitrato e nitrito redutase, glutamina e glutamato sintetase) foram afetadas pela adição de 24 mmol de N, assim os autores concluem que devido a redução na biomassa e na assimilação do N, plantas de feijão verde são sensíveis a altas concentrações de N.

Cruz et al. (2011), observaram que a ervilha é uma planta tolerante ao excesso de N amoniacal e nítrico, de forma que o acúmulo de biomassa e os parâmetros fotossintéticos não foram prejudicados pelo efeito de altas concentrações de N (até 10 mmol), e que foi observada a ativação da enzima glutamato desidrogenase, importante no metabolismo do N, conferindo assim, tolerância a estas plantas.

Britto et al. (2001) estudaram a aquisição de amônio em plantas de cevada (sensível) e arroz (tolerante) ao excesso de amônio. Os autores relataram que, nas células da raiz de cevada ocorre uma falha na regulação do fluxo de amônio, dessa forma, as células iniciam um sistema de efluxo de amônio através da membrana plasmática, consumindo energia. No entanto, para as plantas de arroz a defesa contra o excesso de amônio é energeticamente neutra.

Cruz et al. (2006) estudaram o efeito de altas concentrações de nitrato e de amônio em plantas de alface, espinafre, tomateiro, ervilha e lupinus, com base no local e no nível da atividade enzimática (GDH e GS). Os autores classificaram as plantas de alface, espinafre e tomateiro como não tolerantes ao excesso de amônio, devido a atividade das enzimas GDH e GS serem maiores nas folhas e menores nas raízes, o contrário ocorreu nas plantas de ervilha e lupinus, sendo consideradas tolerantes a toxicidade de amônio.

De acordo com Horchani, Hajri e Aschi-Smiti (2011) as espécies de plantas apresentam diferentes tolerâncias ao excesso de amônio, a exemplo de plantas de trigo, tomateiro e alfafa, sendo consideradas: altamente sensível, moderadamente sensível e tolerante, respectivamente. Os autores verificaram que a atividade das enzimas glutamina sintetase e glutamato desidrogenase nas raízes foram maiores

em plantas de tomate e de alface, sugerindo que o local de assimilação do N é fundamental na tolerância do excesso de amônio.

Schortemeyer, Stamp e Feil (1997) avaliaram quatro híbridos de milho e fontes de N (nitrato e amoniacal) na concentração de 20 mmol. Relataram que em dois híbridos a produção de matéria seca foi prejudicada pelo fornecimento de N amoniacal, entretanto em outros dois híbridos testados não houveram efeitos maléficos quando cultivados com amônio. Os autores concluíram que o suprimento adequado de esqueletos de carbono para a assimilação de amônio nas raízes é necessário para o crescimento sob condições de altas concentrações de amônio, e que houve diferenças genotípicas entre as variedades para esta característica fisiológica.

2.4 Excesso de amônio e de nitrato em plantas de cana-de-açúcar e de pepino

As plantas de cana-de-açúcar e de pepino possuem distintas tolerâncias ao uso de nitrogênio na forma amoniacal, o pepino apresenta sensibilidade ao excesso desse nutriente (ROOSTA; SCHJOERRING, 2008 b). No entanto, a família das poaceas, a exemplo da cana-de-açúcar, possui tolerância ao excesso de amônio (FOY; CHANEY; WHITE, 1978).

Realizou-se estudos sobre a influência da concentração de N e a proporção de amônio e de nitrato sobre a composição mineral de frutos de pepino (KOTSIRAS; et al., 2002). Os autores observaram maiores concentrações de K, Ca, Mg e NO_3^- quando aplicou-se maior proporção de N nítrico, entretanto, quando houve o aumento de N amoniacal, as concentrações destes nutrientes reduziram, resultando em menor qualidade e rendimento dos frutos.

Realizaram-se estudos com fontes de N (nitrato e amoniacal) em diferentes concentrações (1 a 15 mmol) em plantas de pepino (ROOSTA; SCHJOERRING 2007). Os autores verificaram que plantas sob concentrações de amônio acima de 10 mmol, houve supressão do crescimento e menores teores de clorofila, carotenóides, Ca e de Mg, refletindo em cloroses nas folhas e redução no acúmulo de matéria seca, no entanto, sob nitrato as plantas não apresentaram sintomas de toxicidade.

De acordo com Roosta e Schjoerring (2007) plantas de pepino sob excesso de amônio apresentam maior atividade da glutamina sintetase nas folhas em relação às raízes, sugerindo uma baixa assimilação do amônio nas raízes, ocasionando maior sensibilidade do pepino ao excesso de amônio.

Realizou-se estudo com a cultura da cana-de-açúcar sob elevada fertilização nitrogenada (450 kg ha^{-1} de N) na nutrição da planta (SILVEIRA; CROCOMO, 1990). Os autores verificaram que houve maior acúmulo de N e maior atividade da redutase do nitrato para o tratamento com (450 kg ha^{-1} de N) em relação ao tratamento controle (sem fertilização nitrogenada) nas fases iniciais da cultura, após este período os teores de N foliares decresceram mostrando que a cana-de-açúcar apresentou uma elevada capacidade de absorção, redução do nitrato e assimilação de amônia nas fases iniciais das plantas.

Ishikawa et al. (2009) avaliaram o acúmulo de N na cultura da cana-de-açúcar sob alta fertilização nitrogenada (30 a 60 g m^{-1} ano). Os autores concluíram que, a cana-de-açúcar pode ser cultivada sob elevadas concentrações de N devido sua capacidade de não acumular o macronutriente nestas condições.

2.5 Fatores que podem aliviar estresse por excesso de N em plantas

De acordo com Magalhães e Huber (1989) a glutamina sintetase é fundamental na desintoxicação de plantas (arroz, milho e tomateiro) sob altas concentrações de amônio (10 mmol). Estes autores verificaram maiores atividades dessa enzima em plantas de arroz, conseqüentemente, apenas esta espécie não teve seu crescimento prejudicado com a aplicação de amônio.

Um estudo foi realizado em plantas de girassol cultivadas com amônio e nitrato (5 mmol) sob adição de magnésio (LASA et al., 2000). Os autores verificaram que plantas nutridas com amônio apresentaram redução na produção de matéria seca, na assimilação de carbono e nos teores de magnésio, contudo a adição de magnésio na solução resultou na melhoria dos danos causados pelo excesso de amônio.

Em estudo realizado sobre os efeitos da adição de nitrato e de potássio em plantas de pepino cultivados com amônio (10 mmol) (ROOSTA; SCHJOERRING

2008a). No presente trabalho, concluiu-se que as plantas apresentaram sintomas de toxicidade quando cultivadas apenas com o amônio, enquanto que, com a aplicação de nitrato e de potássio estes sintomas foram mitigados, observando aumento das enzimas glutamina sintetase e PEPCase, aliviando a toxicidade por amônio.

Neste contexto, Roosta e Schjoerring (2008b), verificaram que a toxicidade de amônio em plantas de pepino também pode ser mitigada com o fornecimento de carbonatos. Os autores atribuíram este alívio a toxicidade, devido ao enriquecimento do meio com carbono, aumentando assim a síntese de esqueletos de carbono, refletindo em maior assimilação do N amoniacal.

O uso de elemento benéfico, como o Si, também pode atenuar os efeitos causados pelo excesso de N (MA, 2004). Neste contexto, em estudo com plantas de canola sob concentrações de N (nitrato e amoniacal) e adição de Si, Bybordi (2010), verificou que, com o aumento de amônio na presença do elemento benéfico, houve incrementos na produção de matéria fresca e área foliar, observando uma relação benéfica do Si com o excesso de N.

2.6 Silício nas plantas

O silício não é considerado um elemento essencial para as plantas (EPSTEIN, 1999), no entanto, é considerado benéfico (MA, 2004). As plantas absorvem o silício na forma de ácido monossilícico (INAL; PILBEAM; GUNES, 2009) e o mecanismo de absorção é ativo (MALAVOLTA, 2006).

As plantas podem ser consideradas acumuladoras ou não acumuladoras de Si, a exemplos de plantas acumuladoras tem-se a cana-de-açúcar (SAVANT et al., 1999) e o pepino (LIANG et al., 2005).

A importância do silício nas plantas ocorre pelo fato em estar envolvido na rigidez das paredes celulares, possibilitando maior resistência e melhor arquitetura foliar ao vegetal; e atuando na parte fisiológica, aumentando a atividade fotossintética e o crescimento dos vegetais (SAVANT et al., 1999). Os efeitos benéficos do silício estão relacionados com a tolerância de plantas a estresses, sejam estes, bióticos ou abióticos (EPSTEIN, 1999).

O silício alivia estresses bióticos por dois mecanismos de defesa, pelo mecânico, onde ocorre a formação de uma barreira física, de maneira que o silício é depositado sobre a cutícula, originando uma dupla camada, impedindo assim a entrada de patógenos. E pelo mecanismo fisiológico, com a produção de substâncias que inibem a ação do agente causal da doença, a exemplo seriam as fitoalexinas (FAUTEUX et al., 2005; MA; YAMAJI, 2006).

Além disso, o silício aumenta a resistência das plantas a estresses abióticos, tanto de natureza física, incluindo fatores associados à temperatura, luz, seca, geadas, ventos e encharcamentos. Quanto os de natureza química, como desordens nutricionais (MA, 2004).

2.7 Uso do Si na mitigação de estresses por desordens nutricionais em plantas

O Si é conhecido por melhorar a aptidão de diversas culturas a estresses, sendo bióticos e ou abióticos (MATEOS-NARANJO; ANDRADES-MORENO; DAVY, 2013). Dessa forma o uso do elemento benéfico promove efeitos sobre o crescimento e o desenvolvimento das plantas expostas a condições adversas como os causados por desordens nutricionais.

A toxicidade por metais é um grave problema na agricultura, e o silício pode mitigar seus efeitos adversos ao desenvolvimento da planta (EPSTEIN, 1999), não apenas pela diminuição da biodisponibilidade desses metais no solo, mas também pelos efeitos na atividade metabólica, fisiológica e na estrutura das plantas (CUNHA; NASCIMENTO, 2009; SHEN et al., 2010), atuando na defesa do mecanismo fotossintético da planta (FENG et al., 2010).

O Si confere aumento na resistência mecânica das células dos vegetais, tornando as folhas mais eretas, reduzindo o acamamento e o auto-sombreamento, diminui a senescência foliar (LIMA et al., 2011), aumenta a extensibilidade da parede celular (HOSSAIN et al., 2002; VACULÍK et al., 2009), promove alterações na anatomia das folhas aumentando a espessura e a área foliar (FARSHIDI; ABDOLZADEH; SADEGHIPOUR, 2012), e das raízes, incluindo o aumento do tamanho vacuolar (ALI et al., 2013).

Os efeitos do Si no crescimento das plantas sob estresse, tem sido relatados por diversos autores. Prabagar, Hodson e Evans (2011) avaliaram os efeitos do Si em *Picea abies* sob toxicidade de alumínio (Al). Observaram que o Si promoveu a formação de complexos de aluminossilicato, conferindo uma barreira contra a penetração do Al no interior da planta, prevenindo assim, danos às células vegetais.

Em estudos com plantas de espinafre e toxicidade de boro, Gunes et al. (2007) verificaram que o uso do Si atenuou os efeitos deletérios do excesso de B. Isso ocorreu devido o aumento do crescimento das plantas e a condutância estomática, promovendo ainda, diminuição de peróxido de hidrogênio, evitando danos oxidativos a membrana.

O uso do Si na mitigação de estresse por salinidade foi relatado por Zhu et al. (2004), em plantas de pepino. Os autores relataram que a aplicação do elemento benéfico (1 mmol L^{-1}), aumentou o sistema antioxidante, atenuando os efeitos deletérios às folhas ocasionados por este estresse. De acordo com Jiao-jing et al. (2009), o Si aumenta a atividade antioxidante e reduz a peroxidação lipídica, assim, a suplementação com Si protege as folhas contra danos oxidativos, refletindo em folhas com maiores áreas fotossintéticas.

Para Mateos-Naranjo, Andrades-Moreno e Davy (2013), o aumento da fotossíntese promovido pelo Si, em plantas sob condições de estresse, está associado com os efeitos protetores aos mecanismos fotossintéticos, maior eficiência do uso da água e equilíbrio dos nutrientes minerais.

Diversos autores relataram os efeitos do uso do Si na melhoria da fotossíntese em plantas sob estresses, como Feng et al. (2010), em plantas de pepino sob toxicidade por cádmio, Bybordi (2012) e Shi et al. (2013), em plantas de canola e arroz, respectivamente, sob salinidade e Ali et al. (2013) em plantas de cevada sob toxicidade por cromo. Os autores relataram que, o Si promoveu aumento na clorofila, condutância estomática e na taxa de transpiração, contribuindo para o aumento da taxa fotossintética.

A melhoria da condutância estomática e da transpiração conferida pelo uso do Si, pode estar relacionada, com a modificação da resistência hídrica, reduzindo os efeitos de déficit hídricos (HATTORI et al., 2007 e SILVA et al., 2012), ou ainda, com

o aumento nos conteúdos de K promovidos pela aplicação do elemento benéfico (FARSHIDI; ABDOLZADEH; SADEGHIPOUR, 2012).

De acordo com Feng et al. (2010) o silício pode melhorar a fotossíntese, a estrutura dos cloroplastos e o metabolismo do nitrogênio, aumentando as atividades enzimáticas responsáveis pela redução e assimilação do nitrogênio. Evidenciando assim, uma relação do Si com o metabolismo do N.

2.8 Interação do Si com excesso de N

O efeito do Si no metabolismo do N tem sido relatado por diversos autores como Bybordi (2012) e Feng et al. (2010). Estes autores observaram que o uso do elemento benéfico, ocorreu aumento na atividade das enzimas redutase do nitrato, glutamina sintetase, glutamato sintetase e glutamato desidrogenase, promovendo aumento no metabolismo do N.

Em estudo sobre a relação nitrato e amônio, com aplicação de Si (2 e 4 mmol L⁻¹), em plantas de canola sob condições salinas (BYBORDI, 2010). O autor observou uma relação benéfica do Si com amônio, sendo que conforme houve o aumento de amônio na presença do elemento benéfico, houve incrementos na produção de matéria fresca e área foliar, evidenciando dessa forma o efeito benéfico da interação do Si com altas concentrações de amônio.

Os benefícios conferidos pelo Si, sejam pelos efeitos protetores ao aparelho fotossintético dos vegetais ou no equilíbrio dos nutrientes minerais (MATEOS-NARANJO; ANDRADES-MORENO; DAVY, 2013), confrontam os efeitos danosos ocasionados pelo excesso de N, pois o excesso do N nos vegetais causa a indução de deficiência de nutrientes minerais (GERENDAS et al., 1997) e efeitos deletérios na fotossíntese (BRITTO; KRONZUCKER, 2002).

Diante do exposto, observa-se a carência de pesquisas que estudam o uso do silício, que poderá minimizar o estresse, garantindo o melhor desenvolvimento das plantas sob excesso de nitrogênio, especialmente do amônio, que induz distúrbios fisiológicos irreversíveis nas plantas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em casa de vegetação no Departamento de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal-SP, localizada a uma altitude de 610 metros, com as coordenadas geográficas (21°15'22"S e 48°18'58"W) (Figura 1-Apêndice), por meio de sistema hidropônico de cultivo, a partir de dois experimentos, sendo o experimento I, com plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum spp* L.) e o experimento II, com plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.).

3.1 Experimento com plantas de cana-de-açúcar

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação, em sistema hidropônico de cultivo, no período de 19 junho a 13 de agosto de 2012. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições.

Os tratamentos foram em esquema fatorial 2 x 3 x 2, sendo duas fontes com 60 mmol L⁻¹ de nitrogênio (amoniacoal e nítrica), três concentrações de silício (0; 1 e 10 mmol L⁻¹) e duas variedades de cana-de-açúcar (CTC 05 e RB 85-5156). Utilizou-se do cloreto de amônio e do nitrato de cálcio como fontes de N amoniacoal e nítrica, respectivamente, e o silicato de potássio como fonte de Si. Foram realizados balanceamentos das concentrações de potássio e de cálcio entre os tratamentos, mantendo-os uniformes, para tanto, utilizou-se como fonte o cloreto de potássio e o cloreto de cálcio, respectivamente.

Cada unidade experimental constou de um vaso de polipropileno com tampa (48 cm de comprimento x 11 cm de largura da base inferior e 16 cm da base superior x 17 cm de altura), contendo 8 litros de solução nutritiva e seis plantas.

Inicialmente, foram preparados os toletes de cada variedade, cortando-os em 4 cm de comprimento, sendo 2 cm abaixo e 2 cm acima da cicatriz foliar, deixando a gema no meio. Logo após, os toletes com a gema para cima foram inseridos em

recipientes plásticos ($0,5 \text{ dm}^3$), tendo como substrato a areia lavada (Figura 2a-Apêndice), sendo irrigadas diariamente.

Quando as plantas de cana-de-açúcar apresentaram dois pares de folhas desenvolvidas (21 dias após a brotação) (Figura 2b-Apêndice), foram transplantadas para a hidroponia, utilizando espuma fenólica para fixar as plantas nos orifícios presentes nas tampas dos vasos.

A partir deste momento, as plantas foram cultivadas em solução nutritiva, proposta por Hoagland e Arnon (1950), utilizando a concentração de N segundo os tratamentos. A solução nutritiva foi mantida em arejamento contínuo por meio do sistema de compressão de ar.

A solução nutritiva foi trocada semanalmente e adicionados os tratamentos em etapas, para evitar toxicidade precoce do excesso de nitrogênio e prejudicar o efeito do silício nas plantas. Assim, na primeira semana, utilizou-se a solução nutritiva com força iônica de 50% e adicionados os tratamentos, com 25% das concentrações do nitrogênio e 50% das concentrações de silício. A partir da segunda semana de cultivo, utilizou-se da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) com 100% da força iônica, com 50% das concentrações do nitrogênio e 100% das concentrações de silício. A partir da terceira semana, até a quinta semana de cultivo, elevaram-se as concentrações do nitrogênio para 100% e mantiveram-se em 100% as concentrações de silício na solução nutritiva.

A solução nutritiva utilizada com os nutrientes foi a proposta por Hoagland e Arnon (1950), modificada, alterando a fonte de ferro para Fe-EDDHMA. A água utilizada no sistema hidropônico foi destilada e deionizada e, diariamente, foram completados os níveis da solução em cada vaso, com soluções-estoque correspondentes a cada tratamento, e ajustado o valor pH, entre 5,5 e 6,0, com o uso de soluções de HCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ou NaOH $1,0 \text{ mol L}^{-1}$.

3.1.1 Avaliações do experimento com plantas de cana-açúcar

Após 35 dias da aplicação dos tratamentos, foram realizadas as seguintes avaliações:

Altura (cm): foram realizadas avaliações em quatro plantas por unidade experimental, as medidas foram feitas desde a base da espuma fenólica até a inserção da folha +1 (primeira folha completamente desenvolvida com a aurícula visível) com auxílio de régua.

Diâmetro (mm): foram realizadas avaliações em quatro plantas por unidade experimental, as medidas foram feitas a 5 centímetros acima da base da espuma fenólica com auxílio de paquímetro digital (STARRETT® 727-2001).

Área foliar (cm²): coletou-se todas as folhas da planta, em quatro plantas por unidade experimental, utilizou-se um aparelho integrador de áreas portátil (LI-COR® modelo LI-3000C).

Crescimento das raízes: coletou-se um grama de raiz por planta, em quatro plantas por unidade experimental, logo após foram armazenadas em solução de álcool 20% e conservadas sob refrigeração, posteriormente as raízes foram submetidas por cinco minutos a coloração com azul de metileno, em seguida lavadas em água corrente, para retirada do excesso da coloração, colocadas em um recipiente de vidro e levadas a um scanner Hewlett Packard, após este procedimento, determinou-se a área (mm²), diâmetro (mm) e comprimento (mm), por meio do software Delta-T Scan Root Analysis System. Calculou-se ainda a densidade (mm) das raízes, utilizando o comprimento / volume do vaso (8000 ml).

Matéria seca da parte aérea e das raízes: foram coletadas quatro plantas por unidade experimental, logo após as plantas foram separadas em parte aérea e raízes, em seguida lavadas e acondicionadas em sacos de papel, secas em estufa de circulação forçada de ar ($65 \pm 5^{\circ}\text{C}$) até obter massa constante. Após a secagem, obteve-se a massa seca da parte aérea e das raízes (g por planta).

Determinação dos teores de nitrogênio e de silício e o acúmulo na parte aérea e nas raízes: após obter a massa seca da parte aérea e das raízes, foi feito a moagem, em moinho tipo Willey e realizadas análise química da parte aérea e da

raiz, determinando-se os teores de nitrogênio, conforme a metodologia proposta por Bataglia et al. (1983) e de silício, de acordo com Kraska e Breitenbech (2010). A partir dos teores de nitrogênio e de silício e o acúmulo de matéria seca, foi calculado o acúmulo destes elementos na planta (mg por planta).

Avaliações fisiológicas: foram realizadas avaliações de fotossíntese ($\text{mmol CO}_2 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$), condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O s}^{-1} \text{ m}^{-2}$), por meio de um aparelho analisador de gases a infravermelho (LICOR, Inc., LI-6400), sob concentrações de CO_2 ambiente ($372 \pm 10 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), com fluxo de fótons fotossinteticamente ativos de ($1200 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). As medições foram realizadas nas folhas +1, em quatro plantas por tratamento, no período entre as 7 e 8 horas.

Determinação da redutase do nitrato ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$): coletou-se a folha +1, em quatro plantas por tratamento com a fonte de N nítrica, no período entre as 10 e 11 horas e foram armazenadas em gelo, logo em seguida, realizou-se a análise em triplicata (três repetições por amostra) com as folhas in vivo seguindo a metodologia proposta por (CAZETTA; VILLELA, 2004).

3.2. Experimento com plantas de pepino

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação, em sistema hidropônico de cultivo, no período de 7 de janeiro a 18 de fevereiro de 2013. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições.

Os tratamentos foram em esquema fatorial $2 \times 3 \times 2$, sendo duas fontes com 10 mmol L^{-1} de nitrogênio (amoniacoal e nítrica), três concentrações de silício (0; 1 e 10 mmol L^{-1}) e duas variedades de pepino (Hokushin e Tsubasa). Utilizou-se do cloreto de amônio e do nitrato de cálcio como fontes de N amoniacoal e nítrica, respectivamente, e o silicato de potássio como fonte de Si. Foram realizados balanceamentos das concentrações de potássio e de cálcio entre os tratamentos,

mantendo-os uniformes, para tanto, utilizou-se como fonte o cloreto de potássio e o cloreto de cálcio, respectivamente.

Cada unidade experimental constou de um vaso de polipropileno com tampa (48 cm de comprimento x 11 cm de largura da base inferior e 16 cm da base superior x 17 cm de altura), contendo 8 litros de solução nutritiva e seis plantas.

Inicialmente foi realizada a semeadura em bandejas de isopor com 288 células, em substrato Bioplant[®] (Figura 3-Apêndice), foram semeadas duas bandejas para cada cultivar. As mudas foram desenvolvidas em casa de vegetação, com condições de umidade controlada, até apresentarem três folhas (15 dias após a germinação).

Após esse período, foram transplantadas para vasos de polipropileno, utilizou-se isopor para fixar as plantas nos orifícios presentes nas tampas dos vasos e barbante para fazer o tutoramento em cada planta. A partir deste momento, as plantas foram cultivadas em solução nutritiva, proposta por Hoagland e Arnon (1950), utilizando a concentração de N segundo os tratamentos, a solução nutritiva foi mantida em arejamento contínuo por meio do sistema de compressão de ar.

A solução nutritiva foi trocada semanalmente e adicionados os tratamentos em etapas, para evitar toxicidade precoce do excesso de nitrogênio e prejudicar o efeito do silício nas plantas. Assim, na primeira semana, utilizou-se a solução nutritiva com força iônica de 50% e adicionados os tratamentos, com 25% das concentrações do nitrogênio e 50% das concentrações de silício. A partir da segunda semana de cultivo, utilizou-se da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) com 100% da força iônica, com 50% das concentrações do nitrogênio e 100% das concentrações de silício. A partir da terceira semana, até a quarta semana de cultivo, elevaram-se as concentrações do nitrogênio para 100% e mantiveram-se em 100% as concentrações de silício da solução nutritiva.

A solução nutritiva utilizada com os nutrientes foi a proposta por Hoagland e Arnon (1950), modificada, alterando a fonte de ferro para Fe-EDDHMA. A água utilizada no sistema hidropônico foi destilada e deionizada e, diariamente, foram completados os níveis da solução em cada vaso, com soluções-estoque correspondentes a cada tratamento, e ajustado o valor pH, entre 5,5 e 6,0, com o uso de soluções de HCl 1,0 mol L⁻¹ ou NaOH 1,0 mol L⁻¹.

3.2.1. Avaliações do experimento com plantas de pepino

Após 28 dias da aplicação dos tratamentos, foram realizadas as seguintes avaliações:

Altura (cm): foram realizadas avaliações em quatro plantas por unidade experimental, as medidas foram feitas desde a base do isopor até o meristema apical da haste principal, com auxílio de régua.

Diâmetro (mm): foram realizadas avaliações em quatro plantas por unidade experimental, as medidas foram feitas a 5 centímetros acima da base do isopor, com auxílio de paquímetro digital (STARRETT® 727-2001).

Área foliar, crescimento das raízes, matéria seca da parte aérea e das raízes, determinação dos teores de nitrogênio e de silício e o acúmulo na parte aérea e nas raízes: Utilizou-se a mesma metodologia descrita anteriormente no item (3.1.1).

Medida do índice de cor verde: realizaram-se as medidas, na segunda, terceira e quarta folha desenvolvida a partir do ápice, em quatro plantas por unidade experimental, as leituras foram feitas no terço médio das folhas, entre as 11 e 12 horas, obtidas com auxílio de um aparelho medidor de índice de cor verde (Opti-Sciences® CCM-200 Chlorophyll Meter).

Determinação da redutase do nitrato ($\mu\text{Mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$): coletou-se a quarta folha desenvolvida a partir do ápice das plantas, em quatro plantas por tratamento com a fonte de N nítrica, no período entre as 10 e 11 horas e armazenadas em gelo, logo em seguida foi realizado a análise em triplicata (três repetições por amostra) com as folhas in vivo seguindo a metodologia proposta por (CAZETTA; VILLELA, 2004).

Número de estômatos: coletou-se a terceira folha desenvolvida a partir do ápice de uma planta por unidade experimental, no período entre as 7 e 8 horas, em seguida, foram preparadas três lâminas por folha, para tanto, aplicou-se um agente adesivo a base de cianoacrilato na porção mediana da superfície foliar abaxial, logo após pressionou-se a folha a uma lâmina de vidro por dois minutos, obtendo a impressão da superfície da epiderme na lâmina. Para a visualização, utilizou-se microscopia com lente objetiva de 40x. Em cada lâmina foram contados os números de estômatos em três campos de visão, sendo que cada campo correspondia a 0,1 mm² de superfície foliar.

3. 3. Análise dos resultados

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, pelo teste F, seguindo-se da aplicação do teste de Tukey, a 5% de probabilidade, para a comparação das médias, utilizando o programa estatístico SISVAR 3.01 (FERREIRA, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimento com plantas de cana-de-açúcar

4.1.1. Acúmulo de N e de Si

Para o acúmulo de N nas raízes e na parte aérea, houve significância da interação variedades e fontes de N e entre fontes de N e concentrações de Si (Tabela 1).

Tabela 1. Acúmulo de nitrogênio e de silício na parte aérea e na raiz de duas variedades de cana-de-açúcar em função da aplicação de silício e de nitrogênio.

Variedades (V)	N raiz	N parte aérea	Si raiz	Si parte aérea
	----- mg por planta -----			
CTC 05	13,05	133,50	3,70	27,30
RB 85-5156	12,28	110,25	2,84	19,33
DMS	0,41	5,49	0,08	1,02
Si (Si)				
0 mmol L ⁻¹	11,35	109,44	2,02	16,36
1 mmol L ⁻¹	13,25	126,76	3,82	25,41
10 mmol L ⁻¹	13,40	129,43	3,96	28,17
DMS	0,61	8,10	0,11	1,50
Nitrogênio (N)				
NO ₃ ⁻	17,27	161,54	4,51	35,60
NH ₄ ⁺	8,06	82,21	2,03	11,03
DMS	0,41	5,49	0,08	1,02
	----- Teste F -----			
V	14,44 ^{**}	73,87 ^{**}	525,69 ^{**}	251,91 ^{**}
Si	42,61 ^{**}	21,47 ^{**}	1108,54 ^{**}	201,76 ^{**}
N	2063,82 ^{**}	859,85 ^{**}	4337,08 ^{**}	2394,10 ^{**}
V x N	5,45 [*]	125,74 ^{**}	155,85 ^{**}	243,50 ^{**}
V x Si	2,24 ^{ns}	0,06 ^{ns}	5,52 ^{**}	8,75 ^{**}
N x Si	18,23 ^{**}	20,83 ^{**}	35,66 ^{**}	14,14 ^{**}
V x N x Si	0,60 ^{ns}	0,42 ^{ns}	1,26 ^{ns}	5,88 ^{**}
CV (%)	5,5	7,7	4,0	7,5

*, ** e ^{ns}: significativo (P<0,05), (P<0,01) e não significativo, pelo teste F, respectivamente.

Para o acúmulo de Si nas raízes e na parte aérea, houve significância (P<0,01) da interação variedades e fontes de N, variedades e concentrações de Si e fontes de N e concentrações de Si. Na parte aérea houve ainda, efeito (P<0,01) da interação, variedade, fonte de N e concentrações de Si (Tabela 1).

Observou-se maior acúmulo de N nas raízes da “CTC 05” em relação à “RB 85-5156” com a fonte amoniacal; enquanto com a nítrica, não houve diferença (Tabela 2). Quanto ao acúmulo de N na parte aérea, houve diferença entre as variedades apenas para o nitrato, sendo que, “CTC 05” acumulou mais N do que a “RB 85-5156”. Isso ocorreu, possivelmente, devido a maior eficiência de absorção deste nutriente pelas plantas da “CTC 05”, sendo provável que este genótipo tenha maior atividade enzimática relacionadas ao metabolismo do N em relação ao outro.

As variedades apresentaram maior acúmulo de N nas raízes e na parte aérea sob a aplicação de nitrato em relação ao amônio (Tabela 2), o que pode ser explicado, devido o nitrato não ocasionar toxicidade às plantas (LASA et al., 2001 e 2002), entretanto, o excesso de N amoniacal ocasiona danos ao sistema radicular,

como crescimento reduzido e necroses (WONG, 2005), refletindo em menor absorção do mesmo.

Tabela 2. Efeito das interações entre variedades, silício e nitrogênio para o acúmulo de nitrogênio e silício na parte aérea e na raiz de plantas de cana-de-açúcar.

Variedades (V)	Nitrogênio (N)							
	NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻	
	N raiz		N parte aérea		Si raiz		Si parte aérea	
	mg por planta							
CTC 05	8,68aB	17,42aA	78,67aB	188,34aA	2,23aB	5,17aA	11,10aB	43,50aA
RB 85-5156	7,44bB	17,12aA	85,75aB	134,75bA	1,83bB	3,84bA	10,96aB	27,69bA
DMS (V)	0,58		7,76		0,11		1,44	
DMS (N)	0,58		7,76		0,11		1,44	
Silício (Si)								
0 mmol L ⁻¹	5,87bB	16,82aA	57,51bB	161,36aA	1,01bB	3,03cA	5,74bB	26,98cA
1 mmol L ⁻¹	9,10aB	17,40aA	94,49aB	159,03aA	2,49aB	5,15bA	13,07aB	37,75bA
10 mmol L ⁻¹	9,21aB	17,60aA	94,63aB	164,23aA	2,59aB	5,33aA	14,28aB	42,05aA
DMS (Si)	0,86		11,46		0,16		2,13	
DMS (N)	0,71		9,50		0,13		1,76	

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

O acúmulo de N nas raízes e na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar, sob o tratamento com amônio, foi maior com a presença do Si, não havendo diferenças entre as concentrações de 1 e 10 mmol L⁻¹ do elemento benéfico. No entanto, sob N nítrico, a ausência e a presença do elemento benéfico não exerceram efeitos no acúmulo de N nas plantas (Tabela 2).

Em relação ao acúmulo de Si nas raízes, observou-se que, independentemente das fontes de N, a “CTC 05” apresentou maior acúmulo de Si em relação à “RB 85-5156”. Para o acúmulo de Si na parte aérea, houve diferenças entre as variedades apenas no tratamento com a fonte de N nítrica, sendo que a “CTC 05” apresentou o maior acúmulo de Si. Em ambas as variedades, o maior acúmulo de Si nas raízes e na parte aérea ocorreu nas plantas sob a fonte de N nítrica (Tabela 2).

Na ausência do elemento benéfico, às plantas apresentaram menores acúmulos de Si nas raízes e na parte aérea, quando comparadas com as plantas submetidas aos tratamentos com 1 e 10 mmol L⁻¹ de Si. Para a fonte nítrica na presença do Si houve efeito das concentrações 1 e 10 mmol L⁻¹ do elemento

benéfico, obtendo maior acúmulo de Si nas raízes e na parte aérea as plantas que receberam 10 mmol L^{-1} de Si (Tabela 2).

Observou-se que a “CTC 05” apresentou maior acúmulo de Si nas raízes e na parte aérea do que a “RB 85-5156” (Tabela 3). Houve ainda diferenças entre as concentrações de Si para a “CTC 05”, sendo maior o acúmulo de Si em função do aumento das concentrações de Si, o mesmo não ocorreu para a “RB 85-5156”, havendo diferenças apenas entre a ausência e a presença do elemento benéfico (Tabela 3).

Tabela 3. Efeito da interação entre variedades e silício para o acúmulo de silício na raiz e na parte aérea de plantas de cana-de-açúcar.

Variedades (V)	Silício (mmol L^{-1})					
	Si raiz			Si parte aérea		
	0	1	10	0	1	10
	mg por planta					
CTC 05	2,36aC	4,28aB	4,45aA	19,35aC	28,93aB	33,60aA
RB 85-5156	1,68bB	3,36bA	3,48bA	13,37bB	21,89bA	22,73bA
DMS (V)		0,13			1,76	
DMS (Si)		0,16			2,13	

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

4.1.2. Crescimento de plantas de cana-de-açúcar

Para as variáveis de altura, diâmetro, área foliar e matéria seca da parte aérea, houve efeito da interação variedades e fontes de nitrogênio, e entre fontes de nitrogênio e concentrações de silício. Para área foliar, houve efeito entre variedades, fontes de N e concentrações de Si (Tabela 4).

A “CTC 05” apresentou maior área foliar e diâmetro do perfilho do que a “RB 85-5156” independentemente das fontes de N. No entanto, para altura a “RB 85-5156” apresentou maiores valores em relação a “CTC 05” sob a fonte de N amoniacal, contudo, sob a fonte nítrica a “CTC 05” obteve a maior altura. Para o acúmulo de matéria seca da parte aérea, notou-se que não houve diferenças significativas entre as variedades com o uso da fonte de N amoniacal; no entanto, com a nítrica, a “CTC 05” apresentou maior produção de matéria seca (Tabela 5).

Tabela 4. Altura, diâmetro, área foliar e matéria seca (M.S.) da parte aérea de plantas de duas variedades de cana-de-açúcar em função da aplicação de silício e de nitrogênio. UNESP/Jaboticabal, 2012.

Variedades (V)	Altura	Diâmetro	Área foliar	M.S. parte aérea
	cm	mm	cm ² por planta	g por planta
CTC 05	34,07	12,37	387,20	5,26
RB 85-5156	32,63	10,12	273,95	3,71
DMS	0,75	0,26	7,29	0,12
Si (Si)				
0 mmol L ⁻¹	31,13	10,73	291,48	4,10
1 mmol L ⁻¹	34,61	11,54	349,86	4,68
10 mmol L ⁻¹	34,31	11,47	350,37	4,67
DMS	1,11	0,39	10,77	0,17
Nitrogênio (N)				
NO ₃ ⁻	39,53	12,70	452,24	6,92
NH ₄ ⁺	27,17	9,79	208,90	2,05
DMS	0,75	0,26	7,29	0,12
----- Teste F -----				
V	14,97 ^{**}	304,04 ^{**}	991,56 ^{**}	742,99 ^{**}
Si	36,06 ^{**}	16,20 ^{**}	118,13 ^{**}	44,34 ^{**}
N	1111,87 ^{**}	509,03 ^{**}	4577,74 ^{**}	7304,29 ^{**}
V x N	105,01 ^{**}	5,84 [*]	730,55 ^{**}	655,60 ^{**}
V x Si	0,73 ^{ns}	0,79 ^{ns}	2,08 ^{ns}	0,62 ^{ns}
N x Si	34,03 ^{**}	12,29 ^{**}	102,45 ^{**}	35,52 ^{**}
V x N x Si	0,05 ^{ns}	0,83 ^{ns}	3,75 [*]	0,01 ^{ns}
CV (%)	3,9	4,0	3,8	4,4

*, ** e ^{ns} : significativo (P<0,05), (P<0,01) e não significativo pelo teste F, respectivamente.

Atribuem-se estes diferentes efeitos nas plantas, quando submetidas ao excesso de N, à tolerância ao estresse que cada espécie ou variedade possui, sendo determinado por algumas características, como o local de incorporação do N amoniacal em orgânico (LASA et al., 2002), e pelas atividades enzimáticas que participam no processo de desintoxicação do excesso de N (DOUBNEROVÁ; RYSLAVÁ, 2011), atenuando dessa forma o estresse ocorrido nas plantas.

Houve incremento na altura, diâmetro do perfilho, área foliar e na produção de matéria seca da parte aérea em ambas as variedades com a aplicação de N nítrico em relação ao amoniacal (Tabela 5). Fato que ocorreu, devido o N amoniacal ter causado toxicidade às plantas, embora a cana-de-açúcar seja considerada tolerante ao excesso de N (nítrico e amoniacal) (FOY; CHANEY; WHITE, 1978; ISHIKAWA et al., 2009).

Contudo, mesmo em espécies tolerantes, podem ocorrer sintomas de toxicidade, em função da concentração de amônio aplicada (BRITTO;

KRONZUCKER 2002). Entretanto, o excesso de nitrato é tolerável pela maioria das plantas, pois são acumulados nos vacúolos (LASA et al., 2001 e 2002) e nas bainhas foliares, em espécies como a cana-de-açúcar (SILVEIRA; CROCOMO, 1990), não apresentando dessa forma sintomas de toxicidade.

Tabela 5. Efeitos das interações entre variedades, silício e nitrogênio para altura, diâmetro, área foliar e matéria seca (M.S.) da parte aérea de plantas de cana-de-açúcar. UNESP/Jaboticabal, 2012.

Variedades (V)	NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻	
	Altura		Diâmetro do perfilho		Área foliar		M.S. parte aérea	
	cm		mm		cm ²		g por planta	
CTC 05	25,99bB	42,15aA	11,07aB	13,67aA	216,92aB	557,42aA	2,09aB	8,42aA
RB 85-5156	28,36aB	36,91bA	8,51bB	11,73bA	200,38bB	347,01bA	2,00aB	5,41bA
DMS (V)	1,06		0,37		10,32		0,18	
DMS (N)	1,06		0,37		10,32		0,18	
Silício (Si)								
0 mmol L ⁻¹	22,79bB	39,47aA	8,85bB	12,61aA	133,43bB	449,53aA	1,32bB	6,88aA
1 mmol L ⁻¹	29,59aB	39,63aA	10,43aB	12,65aA	245,25aB	454,47aA	2,40aB	6,94aA
10 mmol L ⁻¹	29,13aB	39,49aA	10,10aB	12,85aA	248,03aB	452,72aA	2,40aB	6,93aA
DMS (Si)	1,30		0,55		15,23		0,24	
DMS (N)	1,60		0,45		12,63		0,20	

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Diversos autores, trabalhando com concentrações entre 1 e 24 mmol L⁻¹ de amônio, e plantas com distintas tolerância ao excesso de amônio, relataram que a aplicação desta forma de N ocasionou diminuição nas variáveis de crescimento com reflexos na produção de matéria seca (SÁNCHEZ et al., 2004; ROOSTA; SCHJOERRING, 2007; DOMÍNGUEZ-VALDIVIA et al., 2008; LOPES; ARAUS, 2008; SILVA; COUTO; SANTOS, 2010; JAMPEETONG; BRIX; KANTAWANICHKUL, 2012; BORGOGNONE et al., 2013).

As plantas supridas com N amoniacal na presença de Si (1 e 10 mmol L⁻¹) apresentaram maior altura, diâmetro do perfilho, área foliar e produção de matéria seca da parte aérea, em relação ao tratamento com N amoniacal na ausência do elemento benéfico (Tabela 5). Notou-se que os tratamentos afetaram visualmente a altura das plantas (Figura 4- Apêndice).

A relação benéfica do Si com amônio foi verificada por Bybordi (2010) em estudo com plantas de canola (*Brassica napus* L.) sob concentrações de N (nitrato e

amoniaco) e adição do Si, sendo que, com o aumento de amônio na presença do elemento benéfico, houve incrementos na produção de matéria fresca e área foliar.

Este efeito benéfico no acúmulo de matéria seca, conferido pelo Si, pode estar associado com seus efeitos protetores ao aparelho fotossintético dos vegetais, na melhoria da eficiência do uso da água e no equilíbrio dos nutrientes minerais (MATEOS-NARANJO; ANDRADES-MORENO; DAVY, 2013) proteção contra danos oxidativos às membranas das plantas (JIAO-JING et al., 2009) e aumento da capacidade de extensão da parede celular (HOSSAIN et al., 2002).

Estas explicações são satisfatórias para compreender-se o efeito do uso do Si neste trabalho, pois o excesso de amônio nos vegetais causa indução de deficiência de nutrientes e inibição do crescimento (GERENDÁS et al., 1997), efeitos deletérios na fotossíntese (BRITTO; KRONZUCKER, 2002) e estresse oxidativo nos tecidos (SU et al., 2012). Assim, o uso do Si, possivelmente, mitigou estes efeitos da toxicidade por amônio, refletindo em maiores acúmulos de matéria seca (Tabela 5).

Não houve efeito significativo entre as concentrações de Si com a fonte de N nítrica para as variáveis estudadas (Tabela 5), devido ao efeito benéfico do Si ser potencializado quando os vegetais estão em condições de estresses. Neste caso, o uso elevado de nitrato é tolerável pela maioria das plantas (LASA et al., 2001 e 2002), não ocasionando danos excessivos ao vegetal.

Para as variáveis de área, diâmetro, comprimento, densidade e matéria seca das raízes, houve efeito significativo da interação variedades e fontes de nitrogênio, e entre fontes de nitrogênio e concentrações de silício. Observou-se ainda, efeito da interação variedades e concentrações de Si para área e matéria seca da raiz e efeito da interação variedades, fonte de N e concentrações de Si para matéria seca das raízes (Tabela 6).

A aplicação de N amoniaco resultou em menor área de raiz para a variedade "CTC 05" em relação a "RB 85-5156", no entanto, a "CTC 05" obteve maior diâmetro e acúmulo de matéria seca da raiz (Tabela 7). Não foi observado diferenças entre as variedades para o comprimento e a densidade da raiz, contudo, sob a fonte de N nítrica a "CTC 05" apresentou melhores resultados para todas variáveis analisadas.

Tabela 6. Área, diâmetro, comprimento, densidade e matéria seca (M.S.) da raiz de duas variedades de cana-de-açúcar em função da aplicação de silício e de nitrogênio. UNESP/Jaboticabal, 2012.

Variedades (V)	Área raiz	Diâmetro raiz	Comprimento raiz	Densidade raiz	M.S. raiz
	mm ²	mm	mm	mm	g por planta
CTC 05	1576,04	0,45	4154,00	0,52	0,57
RB 85-5156	1108,82	0,38	3296,10	0,41	0,49
DMS	22,54	0,01	184,24	0,02	0,01
Si (Si)					
0 mmol L ⁻¹	1245,72	0,37	3284,99	0,41	0,48
1 mmol L ⁻¹	1392,02	0,44	3958,78	0,49	0,56
10 mmol L ⁻¹	1389,56	0,44	3931,33	0,49	0,56
DMS	33,28	0,02	272,05	0,03	0,01
Nitrogênio (N)					
NO ₃ ⁻	1886,70	0,40	4357,42	0,54	0,71
NH ₄ ⁺	798,17	0,42	3092,65	0,39	0,35
DMS	22,54	0,01	184,24	0,02	0,01
	----- Teste F -----				
V	1767,60 ^{**}	188,18 ^{**}	89,18 ^{**}	89,21 ^{**}	233,84 ^{**}
Si	75,75 ^{**}	61,29 ^{**}	23,49 ^{**}	23,56 ^{**}	114,87 ^{**}
N	9594,56 ^{**}	14,05 ^{**}	193,83 ^{**}	193,76 ^{**}	5669,08 ^{**}
V x N	2325,61 ^{**}	32,62 ^{**}	122,23 ^{**}	122,14 ^{**}	17,43 ^{**}
V x Si	3,32 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,61 ^{ns}	5,33 ^{ns}
N x Si	70,12 ^{**}	47,23 ^{**}	13,09 ^{**}	13,08 ^{**}	74,52 ^{**}
V x N x Si	1,36 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,11 ^{ns}	4,35 ^{ns}
CV (%)	2,9	4,5	8,5	8,5	3,1

*, ** e ^{ns} : significativo (P<0,05), (P<0,01) e não significativo pelo teste F, respectivamente.

Houve melhoria nas variáveis de crescimento das raízes sob a fonte de N nítrica; pois a mesma não ocasiona toxicidade às plantas (CRUZ et al., 2006) no entanto, a fonte de N amoniacal ocasiona redução ao desenvolvimento das raízes, tornando-as menores e atrofiadas (GERENDAS et al., 1997; HOOPEN et al., 2010; JAMPEETONG; BRIX; KANTAWANICHKUL, 2012) refletindo em prejuízos no acúmulo de matéria seca (AQUINO et al., 2006; ROOSTA; SCHJOERRING, 2007; SILVA; COUTO; SANTOS, 2010).

Observou-se que plantas supridas com fonte de N amoniacal, a presença do Si, independentemente da concentração (1 e 10 mmol L⁻¹) promoveu incremento em todas as variáveis de crescimento das raízes e conseqüentemente na produção de matéria seca. No entanto, plantas supridas com fonte de N nítrica, a aplicação de Si não afetou as variáveis de crescimento e de produção de matéria seca das raízes

(Tabela 7). Notou-se que os tratamentos afetaram visualmente o volume das raízes (Figura 5- Apêndice).

O excesso de nitrato é tolerado por plantas de cana-de-açúcar (ISHIKAWA et al., 2009), não ocasionando condições de estresse. Entretanto o excesso de amônio ocasiona estresse mesmo em plantas tolerantes (BRITTO; KRONZUCKER, 2002). O uso do Si promoveu incremento nas variáveis de crescimento das raízes apenas nos tratamentos com excesso de amônio, confirmando seu benefício às plantas em condições adversas.

Tabela 7. Efeitos das interações entre variedades, concentrações de silício e fontes de nitrogênio para área da raiz, diâmetro da raiz, comprimento da raiz, densidade da raiz e matéria seca (M.S.) da raiz de plantas de cana-de-açúcar. UNESP/Jaboticabal, 2012.

Variedades (V)	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
	Área raiz mm ²		Diâmetro raiz mm		Comprimento raiz mm		Densidade raiz mm		M.S. raiz g por planta	
CTC 05	763,82bB	2388,27aA	0,45aA	0,46aA	3019,41aB	5288,53aA	0,38aB	0,66aA	0,38aB	0,76aA
RB 85-5156	832,51aB	1385,13bA	0,40bA	0,35bB	3165,90aA	3426,31bA	0,40aB	0,43bA	0,32bB	0,66bA
DMS (V)	31,87		0,02		260,6		0,03		0,01	
DMS (N)	31,87		0,02		260,6		0,03		0,01	
Silício (Si)										
0 mmol L ⁻¹	608,48bB	1882,97aA	0,35bB	0,40aA	2324,16bB	4245,82aA	0,29bB	0,53aA	0,26bB	0,70aA
1 mmol L ⁻¹	890,80aB	1893,24aA	0,46aA	0,41aB	3481,26aB	4436,31aA	0,44aB	0,55aA	0,40aB	0,72aA
10 mmol L ⁻¹	895,22aB	1883,91aA	0,46aA	0,41aB	3472,56aB	4390,13aA	0,43aB	0,55aA	0,40aB	0,71aA
DMS (Si)	47,07		0,02		384,7		0,05		0,02	
DMS (N)	39,04		0,02		319,1		0,04		0,02	

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ambas as variedades na presença do Si, apresentaram incrementos na área e na matéria seca das raízes. No entanto, a “CTC 05” apresentou maior área e acúmulo de matéria seca em relação a “RB 85-5156”. Houve efeito apenas entre a presença e a ausência do elemento benéfico, não foram observadas diferenças entre as concentrações 1 e 10 mmol L⁻¹ de Si, para as variedades e variáveis analisadas (Tabela 8).

Tabela 8. Efeito da interação entre variedades e silício para área e matéria seca (M.S.) da raiz de plantas de cana-de-açúcar. UNESP/Jaboticabal, 2012.

Variedades (V)	----- Silício (mmol L ⁻¹) -----					
	0			10		
	Área raiz mm ²			M.S. raiz g por planta		
CTC 05	1499,59aB	1615,85aA	1612,70aA	0,51aB	0,60aA	0,60aA
RB 85-5156	991,83bB	1168,18bA	1166,43bA	0,45bB	0,52bA	0,51bA
DMS (V)	39,04			0,02		
DMS (Si)	47,07			0,02		

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.1.3. Variáveis fisiológicas e atividade da redutase do nitrato

Os processos de transpiração e de condutância estomática apresentaram efeitos significativos ($P < 0,01$) para a interação variedades e fontes de N e entre fontes de N e concentrações de silício. Para fotossíntese, houve efeito ($P < 0,01$) para a interação entre variedades e fontes de N, variedades e concentrações de Si, fontes de N e concentrações de Si e entre variedades, fontes de N e concentrações de Si (Tabela 9).

A atividade da enzima redutase do nitrato apresentou efeito ($P < 0,01$) para variedades, entretanto, para concentrações de Si e a interação variedades e concentrações de Si, não houve efeito significativo (Tabela 9). Notou-se que a atividade desta enzima foi maior na “RB 85-5156” do que na “CTC 05”.

Embora o Si promova aumento da atividade da redutase do nitrato em plantas sob estresse por desordem nutricional (FENG et al., 2010). No presente estudo o uso do Si não apresentou efeitos na atividade da enzima redutase do nitrato (Tabela 9), corroborando Bybordi (2010), em estudos envolvendo Si e nitrato em plantas de canola (*Brassica napus* L.).

Tabela 9. Transpiração, condutância estomática, fotossíntese e atividade da redutase do nitrato de duas variedades de cana-de-açúcar em função da aplicação de silício e de nitrogênio.

Variedades (V)	Transpiração mmol H ₂ O/s ⁻¹ /m ⁻²	Condutância estomática mol m ⁻² s ⁻¹	Fotossíntese mmol CO ₂ /s ⁻¹ /m ⁻²	Redutase do nitrato μmol g ⁻¹ h ⁻¹
CTC 05	2,30	0,11	10,63	10,04b
RB 85-5156	1,10	0,05	5,13	13,99a
DMS	0,16	0,01	0,34	0,48
Si (Si)				
0 mmol L ⁻¹	1,39	0,06	4,16	11,80
1 mmol L ⁻¹	1,93	0,08	10,86	12,06
10 mmol L ⁻¹	1,80	0,08	8,64	12,18
DMS	0,24	0,01	0,50	0,71
Nitrogênio (N)				
NO ₃ ⁻	2,32	0,04	11,20	-
NH ₄ ⁺	1,09	0,11	4,57	-
DMS	0,16	0,01	0,34	-
	----- Teste F -----			
V	217,87**	220,51**	1103,11**	302,79**
Si	15,88**	11,87**	565,88**	1,00 ^{ns}
N	227,66**	232,76**	1602,54**	-
V x N	25,71**	34,80**	72,50**	-
V x Si	2,25 ^{ns}	3,18 ^{ns}	19,38**	1,20 ^{ns}
N x Si	9,23**	10,33**	3,39**	-
V x N x Si	3,17 ^{ns}	2,56 ^{ns}	49,42**	-
CV (%)	16,5	18,8	7,3	4,6

*, ** e ^{ns}: significativo (P<0,05), (P<0,01) e não significativo, pelo teste F, respectivamente.

A “CTC 05” apresentou maiores taxas de transpiração, condutância estomática e fotossíntese, em ambas as fontes de N, comparada a “RB 85-5156” (Tabela 10). Resultados semelhantes sobre o efeito do N na fisiologia da planta foram relatados por Cruz et al. (2011), em estudos com variedades de plantas de ervilha (*Pisum sativum*) e concentrações de amônio, verificaram que entre as variedades houve diferenças nas variáveis fisiológicas.

A fonte de N amoniacal promoveu menor transpiração, condutância estomática e fotossíntese em relação à nítrica (Tabela 10). Muitos fatores têm sido atribuídos ao fato do excesso de amônio afetar os processos fisiológicos das plantas, como a condutância estomática, sendo associado com a menor absorção de água (HORCHANI; HAJRI; ASCHI-SMITI, 2011), prejudicando a abertura e o fechamento dos estômatos, interferindo dessa forma na transpiração e na fotossíntese (LOPES; ARAUS, 2006).

Além disso, o excesso de amônio pode comprometer a fotossíntese de várias maneiras, afetando a estrutura foliar, com menores áreas foliares (LOPES; ARAUS,

2006) à arquitetura foliar, uma vez que o excesso de amônio promove nos tecidos maior succulência (MALAVOLTA, 2006) e comprometimento das folhas, devido ao aparecimento de cloroses e necroses (WONG, 2005). Assim, os prejuízos fisiológicos, causados pela toxicidade de amônio, refletiram na menor produção de matéria seca das plantas (Tabela 5).

Contudo, o uso do N nítrico promoveu aumento nas variáveis fisiológicas em ambas às variedades em relação o amoniacal (Tabela 10). Vários autores, relataram que altas concentrações de nitrato não ocasionaram efeitos deletérios à fotossíntese, condutância estomática e transpiração (LOPES; ARAUS, 2006 e 2008; HORCHANI; HAJRI; ASCHI-SMITI, 2011; BORGOGNONE et al., 2013), evidenciando que esta fonte de N em excesso não ocasiona danos aos vegetais.

Tabela 10. Efeito das interações entre variedades, silício e nitrogênio para transpiração, condutância estomática e fotossíntese de plantas de cana-de-açúcar.

Variedades (V)	Nitrogênio (N)					
	NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		NO ₃ ⁻	
	Transpiração		Condutância estomática		Fotossíntese	
	mmol H ₂ O/s ⁻¹ /m ⁻²		mol m ⁻² s ⁻¹		mmol CO ₂ /s ⁻¹ /m ⁻²	
CTC 05	1,48aB	3,12aA	0,06aB	0,15aA	6,61aB	14,65aA
RB 85-5156	0,70bB	1,51bA	0,03bB	0,06bA	2,52bB	7,42bA
DMS (V)	0,23		0,01		0,47	
DMS (N)	0,23		0,01		0,47	
Silício (Si)						
0 mmol L ⁻¹	0,53bB	2,25aA	0,02bB	0,11aA	0,78cB	7,54cA
1 mmol L ⁻¹	1,45aB	2,40aA	0,06aB	0,11aA	7,31aB	14,40aA
10 mmol L ⁻¹	1,29aB	2,30aA	0,06aB	0,10aA	5,61bB	11,66bA
DMS (Si)	0,34		0,02		0,70	
DMS (N)	0,29		0,01		0,58	

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Para a fonte de N nítrica, a presença do Si (1 mmol L⁻¹) promoveu maior taxa fotossintética às plantas, não afetando as demais variáveis (Tabela 10). No entanto, em plantas sob N amoniacal, o uso do Si promoveu incrementos nas variáveis de transpiração, condutância estomática e fotossíntese.

Trabalhos evidenciam a contribuição do Si no aumento da fotossíntese nos vegetais em condições de estresse, como, em excesso de boro (GUNES et al., 2007) e de cromo (ALI et al., 2013). O Si promove maior rigidez aos tecidos e

aumento da resistência mecânica das células, tornando as folhas com melhor arquitetura, conferindo maior área fotossintética (LIMA et al., 2011).

Pode-se relacionar estes benefícios com os proporcionados pelo uso do Si neste trabalho, atenuando os efeitos deletérios causados pela toxicidade de amônio nas folhas (Figura 6- Apêndice), conferindo às plantas maiores áreas foliares (Tabela 5) e refletindo no aumento da fotossíntese (Tabela 10). Além disso, o aumento da condutância estomática e da transpiração promovido pelo Si corrobora os resultados relatados por ALI et al. (2013); SHI et al. (2013) em estudos com estresse ocasionados por cromo e salinidade, respectivamente.

O Si aumenta a condutância estomática (FARSHIDI; ABDOLZADEH; SADEGHIPOUR, 2012) promovendo uma melhor eficiência do uso da água (MATEOS-NARANJO; ANDRADES-MORENO; DAVY, 2013), induzindo o aumento da transpiração. Estes resultados, em que o uso do Si beneficia os processos fisiológicos relacionados à fotossíntese, assemelham-se com os do presente estudo (Tabela 10 e 11), e isto refletiu no crescimento, promovendo maior acúmulo de matéria seca das plantas de cana-de-açúcar sob toxicidade de amônio (Tabela 5).

Houve diferenças entre as variedades e concentrações de Si para a fotossíntese (Tabela 11), sendo que na ausência de Si resultou em menor taxa fotossintética, e na presença de Si com a concentração de 1 mmol L^{-1} , obteve-se a maior taxa fotossintética em ambas variedades. Contudo, a “CTC 05” apresentou maior fotossíntese em relação à “RB 85-5156”.

Tabela 11. Efeito da interação entre variedades e concentrações de silício para fotossíntese de plantas de cana-de-açúcar.

Variedades (V)	Silício (mmol L^{-1})		
	0	1	10
	----- $\text{mmol CO}_2/\text{s}^{-1}/\text{m}^{-2}$ -----		
CTC 05	6,19aC	14,06aA	11,65aB
RB 85-5156	2,13bC	7,65bA	5,62bB
DMS (V)		0,58	
DMS (Si)		0,70	

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

4.2. Experimento com plantas de pepino

4.2.1. Acúmulo de N e de Si

Para o acúmulo de nitrogênio nas raízes e na parte aérea, houve significância para a interação variedades e fontes de nitrogênio e entre fontes de nitrogênio e concentrações de silício (Tabela 12).

Para o acúmulo de Si nas raízes e na parte aérea, houve efeitos significativos da interação variedades e fontes de N, variedades e concentrações de Si e entre, fontes de N e concentrações de Si (Tabela 12).

Tabela 12. Acúmulo de nitrogênio e de silício na parte aérea e na raiz de duas variedades de pepino em função da aplicação de silício e de nitrogênio.

Variedades (V)	N raiz	N parte aérea	Si raiz	Si parte aérea
	mg por planta			
Hokushin	9,60	137,82	0,86	6,33
Tsubasa	11,75	145,47	1,18	6,71
DMS	0,51	4,71	0,05	0,27
Si (Si)				
0 mmol L ⁻¹	8,67	110,76	0,46	3,08
1 mmol L ⁻¹	11,60	157,04	1,31	8,20
10 mmol L ⁻¹	11,75	157,13	1,29	8,29
DMS	0,76	6,95	0,08	0,40
Nitrogênio (N)				
NO ₃ ⁻	12,41	174,26	1,23	8,49
NH ₄ ⁺	8,94	109,03	0,81	4,56
DMS	0,51	4,71	0,05	0,27
----- Teste F -----				
V	71,99**	10,86**	149,32**	8,06**
Si	62,57**	177,23**	461,59**	653,61**
N	187,76**	790,77**	260,30**	853,37**
V x N	9,57*	111,49**	8,20**	19,90**
V x Si	0,09 ^{ns}	0,07 ^{ns}	10,54**	3,59*
N x Si	57,45**	75,61**	4,21*	17,62**
V x N x Si	0,46 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,44 ^{ns}	2,00 ^{ns}
CV (%)	8,2	5,7	8,9	7,2

*, ** e ^{ns}: significativo (P<0,05), (P<0,01) e não significativo pelo teste F, respectivamente.

Observou-se maior acúmulo de N nas raízes da “Tsubasa” em relação à “Hokushin” em ambas as fontes de N (Tabela 13). Quanto ao acúmulo de N na parte aérea, a “Tsubasa” apresentou maior acúmulo de N do que à “Hokushin” sob N amoniacal, no entanto, sob N nítrico a “Hokushin” apresentou o maior acúmulo de N. Este fato pode ser atribuído as características distintas existentes entre as espécies

de plantas e até mesmo variedades, quanto à fertilização nitrogenada (LASA et al., 2002).

Ambas as variedades apresentaram maior acúmulo de N nas raízes e na parte aérea sob N nítrico em relação ao amoniacal (Tabela 13), atribui-se este resultado ao nitrato não ocasionar toxicidade às plantas (LASA et al., 2001 e 2002), entretanto, o excesso de N amoniacal ocasiona danos ao sistema radicular, como crescimento reduzido e necroses (WONG, 2005), refletindo em menor absorção do mesmo.

Tabela 13. Efeitos das interações entre variedades, silício e nitrogênio para o acúmulo de nitrogênio e de silício na parte aérea e na raiz de plantas de pepino.

Variedades (V)	Nitrogênio (N)							
	NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻	
	N raiz		N parte aérea		Si raiz		Si parte aérea	
	mg por planta							
Hokushin	8,25bB	10,94bA	92,95bB	182,69aA	0,69bB	1,04bA	4,06bB	8,60aA
Tsubasa	9,62aB	13,88aA	125,09aB	165,83bA	0,93aB	1,43aA	5,05aB	8,38aA
DMS (V)	0,73		6,65		0,08		0,39	
DMS (N)	0,73		6,65		0,08		0,39	
Silício (Si)								
0 mmol L ⁻¹	5,01bB	12,33aA	57,99bB	163,53bA	0,20bB	0,72bA	1,67bB	4,49bA
1 mmol L ⁻¹	10,85aB	12,35aA	135,33aB	178,75aA	1,14aB	1,49aA	6,02aB	10,38aA
10 mmol L ⁻¹	10,95aB	12,55aA	133,75aB	180,51aA	1,10aB	1,48aA	5,98aB	10,61aA
DMS (Si)	1,07		9,83		0,11		0,57	
DMS (N)	0,89		8,15		0,09		0,47	

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O acúmulo de N nas raízes e na parte aérea das plantas sob o tratamento com amônio, foi maior na presença do Si, não havendo diferenças entre as concentrações de 1 e 10 mmol L⁻¹ do elemento benéfico. No entanto, sob N nítrico o uso do Si não exerceu efeito no acúmulo de N nas plantas.

Quanto ao acúmulo de Si nas raízes, observou-se que, independentemente das fontes de N, a “Tsubasa” apresentou maior acúmulo de Si em relação à “Hokushin”. Para o acúmulo de Si na parte aérea, houve diferenças entre as variedades apenas no tratamento com a fonte de N amoniacal, onde a “Tsubasa” apresentou o maior acúmulo de Si. Em ambas as variedades, o maior acúmulo de Si nas raízes e na parte aérea ocorreu em plantas sob fonte de N nítrica (Tabela 13).

Na ausência do elemento benéfico em ambas as fontes de N, as plantas apresentaram menores acúmulos de Si nas raízes e na parte aérea, do que às

submetidas à aplicação de Si. Não foi verificado efeitos sobre o acúmulo de Si entre as concentrações de 1 e 10 mmol L⁻¹ de Si, independentemente da variedade e da fonte de N. O acúmulo de Si nas raízes e na parte aérea foi menor em plantas cultivadas com N amoniacal em relação ao N nítrico (Tabela 13).

Observou-se que a variedade Tsubasa apresentou maior acúmulo de Si nas raízes em relação à “Hokushin” (Tabela 14). No entanto, para o acúmulo de Si na parte aérea houve diferenças entre as variedades apenas para a ausência do elemento benéfico, de modo que, a “Tsubasa” apresentou o maior acúmulo de Si.

Tabela 14. Efeito da interação entre variedades e silício para o acúmulo de silício na raiz e na parte aérea de plantas de pepino.

Variedades (V)	Silício (mmol L ⁻¹)					
	Si raiz			Si parte aérea		
	0	1	10	0	1	10
Hokushin	0,38bB	1,11bA	1,09bA	2,63bB	8,13aA	8,24aA
Tsubasa	0,53aB	1,52aA	1,50aA	3,53aB	8,27aA	8,35aA
DMS (V)	0,09			0,47		
DMS (Si)	0,03			0,57		

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Houve efeito sobre o acúmulo de Si na raiz e na parte aérea, entre a ausência e a presença do elemento benéfico em ambas as variedades, não sendo observado efeitos entre as concentrações de 1 e 10 mmol L⁻¹ de Si (Tabela 14).

4.2.2. Crescimento de plantas de pepino

Para as variáveis de altura, diâmetro, área foliar e matéria seca da parte aérea, houve efeito da interação, variedades e fontes de nitrogênio e entre fontes de nitrogênio e concentrações de silício (Tabela 15).

Com o uso de N amoniacal a “Tsubasa” apresentou maior altura, área foliar e matéria seca da parte aérea do que a “Hokushin”, entretanto, sob N nítrico, plantas da variedade “Hokushin” apresentaram maiores valores para as variáveis de crescimento e acúmulo de matéria seca (Tabela 16). Contudo, para o diâmetro não houve efeito entre as variedades com a fonte de N amoniacal, apenas sob a fonte

nítrica, sendo que, plantas da “Hokushin” obtiveram maiores diâmetros em relação às da outra variedade.

Tabela 15. Altura, diâmetro, área foliar e acúmulo de matéria seca (M.S.) da parte aérea de plantas de duas variedades de pepino, em função da aplicação de silício e de nitrogênio.

Variedades (V)	Altura	Diâmetro	Área foliar	M.S. parte aérea
	cm	mm	cm ²	g por planta
Hokushin	88,13	5,39	989,58	3,28
Tsubasa	91,04	5,35	1004,21	3,35
DMS	1,84	0,13	46,88	0,09
Si (Si)				
0 mmol L ⁻¹	76,44	4,77	868,38	2,85
1 mmol L ⁻¹	96,00	5,66	1056,77	3,54
10 mmol L ⁻¹	96,31	5,67	1065,53	3,56
DMS	2,72	0,19	69,23	0,14
Nitrogênio (N)				
NO ₃ ⁻	104,42	5,86	1349,20	4,38
NH ₄ ⁺	74,75	4,88	644,59	2,25
DMS	1,84	0,13	46,88	0,09
----- Teste F -----				
V	10,35 ^{**}	0,40 ^{ns}	0,40 ^{ns}	2,67 ^{ns}
Si	210,34 ^{**}	84,33 ^{**}	30,96 ^{**}	104,84 ^{**}
N	1071,01 ^{**}	222,13 ^{**}	929,13 ^{**}	2200,74 ^{**}
V x N	230,07 ^{**}	11,29 ^{**}	25,51 ^{**}	130,21 ^{**}
V x Si	0,65 ^{ns}	0,51 ^{ns}	1,27 ^{ns}	0,90 ^{ns}
N x Si	189,55 ^{**}	76,44 ^{**}	27,88 ^{**}	86,71 ^{**}
V x N x Si	0,46 ^{ns}	1,16 ^{ns}	1,39 ^{ns}	2,82 ^{ns}
CV (%)	3,5	4,2	8,0	4,8

*, ** e ^{ns} : significativo (P<0,05), (P<0,01) e não significativo pelo teste F, respectivamente.

Estes resultados podem ser atribuídos, as diferentes respostas ao excesso de N entre as variedades de plantas (LASA et al., 2002; CRUZ et al., 2011; HORCHANI; HAJRI; ASCHI-SMITI, 2011), devido as características que cada espécie e variedade possui, quanto ao local de incorporação do N amoniacal em orgânico (LASA et al., 2002), e atividades enzimáticas que participam no processo de desintoxicação do excesso de N (DOUBNEROVÁ; RYSLAVÁ, 2011).

Houve incremento nas variáveis de crescimento e, conseqüentemente, na produção de matéria seca da parte aérea em ambas as variedades com a aplicação de N nítrico em relação ao amoniacal (Tabela 16). Este fato ocorreu devido o excesso de N amoniacal causar toxicidade as plantas de pepino, que é caracterizado como sensível ao excesso de amônio (ROOSTA et al., 2009). Resultados semelhantes foram relatados por Roosta e Schjoerring (2007) em

estudos com plantas de pepino e fontes de N (níttrica e amoniacal). Os autores verificaram que o acúmulo de matéria seca foi menor em plantas cultivadas com N amoniacal em relação às cultivadas com N nítrico.

Tabela 16. Efeitos das interações entre variedades, silício e nitrogênio para altura, diâmetro, área foliar e matéria seca (M.S.) da parte aérea de plantas de pepino.

Variedades (V)	NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻	
	Altura cm		Diâmetro mm		Área foliar cm ²		M.S. parte aérea g por planta	
Hokushin	66,42bB	109,83aA	4,80aB	5,99aA	578,90bB	1400,26aA	1,95bB	4,61aA
Tsubasa	83,08aB	99,00bA	4,97aB	5,73bA	710,28aB	1298,14bA	2,55aB	4,16bA
DMS (V)	2,60		0,19		66,30		0,13	
DMS (N)	2,60		0,19		66,30		0,13	
Silício (Si)								
0 mmol L ⁻¹	49,13bB	103,75aA	3,72bB	5,83aA	394,07bB	1342,69aA	1,36bB	4,34aA
1 mmol L ⁻¹	87,25aB	104,75aA	5,47aB	5,86aA	768,20aB	1345,35aA	2,70aB	4,37aA
10 mmol L ⁻¹	87,88aB	104,74aA	5,46aB	5,88aA	771,51aB	1359,55aA	2,69aB	4,44aA
DMS (Si)	3,84		0,28		97,90		0,19	
DMS (N)	3,18		0,23		81,20		0,16	

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O excesso de amônio em plantas de pepino ocasiona desequilíbrio entre os nutrientes, induzindo a deficiência de cálcio e de magnésio (ROOSTA; SCHJOERRING, 2007), prejuízos no rendimento e tamanho dos frutos (KOTSIRAS; OLYMPIOS; PASSAM, 2005) com conseqüências danosas a produção de matéria seca.

O uso de amônio em concentrações acima de 5 mmol L⁻¹ ocasiona danos ao crescimento e desenvolvimento das plantas de pepino (ROOSTA; SCHJOERRING, 2008a; ROOSTA et al., 2009). Essa baixa tolerância ao excesso de amônio em plantas de pepino pode estar associada ao local de assimilação do amônio, sendo que a maior parte é assimilado na parte aérea (ROOSTA et al., 2009), e também pelo nível da atividade enzimática (glutamato desidrogenase e glutamina sintetase) (CRUZ et al., 2006).

Entretanto, o excesso de nitrato é tolerável pela maioria das plantas, pois são acumulados nos vacúolos (LASA et al., 2001 e 2002) não apresentando dessa forma sintomas de toxicidade.

Observou-se que as plantas supridas com N amoniacal na presença de Si (1 e 10 mmol L⁻¹) apresentaram melhores resultados nas variáveis de altura, diâmetro, área foliar e matéria seca da parte aérea, em relação ao tratamento com N amoniacal na ausência do elemento benéfico (Tabela 16). Notou-se que os tratamentos afetaram visualmente a altura das plantas (Figura 7- Apêndice).

O efeito benéfico do silício sobre o crescimento de plantas de pepino em condições de estresse, foi comprovado por vários pesquisadores, a exemplo, Zhu et al. (2004) verificaram que o uso de Si (1mmol L⁻¹), sob condições de estresse por salinidade, promoveu aumento nas variáveis de crescimento, refletindo em maior acúmulo de matéria seca, atribuindo estes resultados a redução por danos oxidativos das membranas que o Si conferiu às plantas.

O Si promove o aumento da atividade antioxidante nos vegetais, reduzindo a peroxidação lipídica, conferindo proteção às plantas contra danos oxidativos e refletindo no crescimento e desenvolvimento das mesmas (JIAO-JING et al., 2009).

Estes efeitos no crescimento conferido pelo Si em condições de excesso de amônio, pode estar associado com seus efeitos protetores ao aparelho fotossintético dos vegetais (MATEOS-NARANJO; ANDRADES-MORENO; DAVY, 2013), devido o amônio em excesso ocasionar efeitos danosos a fotossíntese (BRITTO; KRONZUCKER, 2002). Assim o uso do Si possivelmente mitigou este efeito da toxicidade por amônio.

Não foram observados efeitos significativos, entre as concentrações de Si com a fonte de N nítrica para as variáveis estudadas, no entanto, o uso dessa fonte de N, propiciou melhores resultados nas variáveis de crescimento e de produção de matéria seca, independentemente da presença ou ausência do Si (Tabela 16).

Para área, diâmetro, comprimento, densidade e matéria seca das raízes, houve efeito da interação fontes de nitrogênio e concentrações de Si. Houve ainda efeito da interação variedades e fontes de nitrogênio para área e matéria seca da raiz (Tabela 17).

Houve diferenças (P<0,01) entre variedades para o comprimento e a densidade da raiz, sendo que, a “Tsubasa” apresentou maior comprimento e densidade da raiz do que a “Hokushin”. Para o diâmetro da raiz não verificou-se diferenças entre as variedades (Tabela 17).

Tabela 17. Área da raiz, diâmetro da raiz, comprimento da raiz, densidade da raiz e matéria seca (M.S.) da raiz de duas variedades de pepino em função da aplicação de silício e de nitrogênio.

Variedades (V)	Área raiz	Diâmetro raiz	Comprimento raiz	Densidade raiz	M.S. raiz
	mm ²	mm	mm	mm	g por planta
Hokushin	1046,13	0,33	3704,88 b	0,46 b	0,27
Tsubasa	1158,64	0,34	4066,34 a	0,51 a	0,33
DMS	44,40	0,02	229,43	0,03	0,01
Si (Si)					
0 mmol L ⁻¹	1058,38	0,29	3582,06	0,45	0,26
1 mmol L ⁻¹	1125,57	0,35	4036,55	0,50	0,32
10 mmol L ⁻¹	1123,20	0,36	4038,23	0,50	0,33
DMS	65,57	0,03	338,78	0,04	0,02
Nitrogênio (N)					
NO ₃ ⁻	1191,55	0,34	3825,57	0,48	0,39
NH ₄ ⁺	1013,22	0,33	3945,65	0,49	0,21
DMS	44,40	0,02	229,43	0,03	0,01
	----- Teste F -----				
V	26,41 ^{**}	0,88 ^{ns}	10,21 ^{**}	10,17 ^{**}	109,52 ^{**}
Si	4,04 [*]	16,99 ^{**}	7,20 ^{**}	7,20 ^{**}	61,91 ^{**}
N	66,35 ^{**}	2,72 ^{ns}	1,13 ^{ns}	1,13 ^{ns}	1012,70 ^{**}
V x N	14,74 ^{**}	0,10 ^{ns}	1,36 ^{ns}	1,35 ^{ns}	47,79 ^{**}
V x Si	0,39 ^{ns}	1,41 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,27 ^{ns}
N x Si	8,17 ^{**}	17,17 ^{**}	7,17 ^{**}	7,15 ^{**}	62,39 ^{**}
V x N x Si	2,66 ^{ns}	1,49 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,35 ^{ns}
CV (%)	6,9	10,7	10,1	10,1	6,5

*, ** e ^{ns}: significativo (P<0,05), (P<0,01) e não significativo pelo teste F, respectivamente.

O uso do Si (1 e 10 mmol L⁻¹) em plantas supridas com N amoniacal, promoveu incremento em todas as variáveis de crescimento das raízes e consequentemente na produção de matéria seca em relação ao tratamento com a ausência do elemento benéfico, no entanto, plantas supridas com N nítrico, a aplicação de Si não surtiu efeito nas variáveis de crescimento e de produção de matéria seca das raízes (Tabela 18). Notou-se que os tratamentos afetaram visualmente o volume das raízes (Figura 8- Apêndice).

O excesso de nitrato é tolerado por plantas de pepino, não ocasionando danos as raízes, entretanto o excesso de amônio em plantas de pepino ocasiona prejuízos ao desenvolvimento do sistema radicular (ROOSTA; SCHJOERRING, 2007). Assim o Si promoveu incremento nas variáveis de crescimento das raízes apenas nos tratamentos com excesso de amônio, confirmando seu benefício às plantas em condições adversas.

Estes efeitos do Si são atribuídos a mitigação dos danos oxidativos as raízes dos vegetais sob estresse, refletindo em maior desenvolvimento do sistema radicular (GUNES et al., 2007).

Observou-se maior área e matéria seca das raízes em plantas sob N nítrico independentemente das concentrações de Si. Na ausência do elemento benéfico houve maior diâmetro, comprimento e densidade de raiz sob N nítrico em relação ao amoniacal, entretanto, na presença do Si essas variáveis foram maiores sob a fonte de N amoniacal (Tabela 18).

Tabela 18. Efeitos das interações entre concentrações de silício e fontes de nitrogênio para área da raiz, diâmetro da raiz, comprimento da raiz, densidade da raiz e matéria seca (M.S.) das raízes de plantas de pepino.

Silício (Si)	NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻	
	Área raiz		Diâmetro raiz		Comprimento raiz		Densidade raiz		M.S. raiz			
	mm ²		mm		mm		mm		g por planta			
0 mmol L ⁻¹	906,75bB	1210,01aA	0,24bB	0,34aA	3339,20bB	3824,93aA	0,42bB	0,48aA	0,12bB	0,39aA		
1 mmol L ⁻¹	1070,69aB	1180,45aA	0,37aA	0,34aA	4248,83aA	3824,27aB	0,53aA	0,47aB	0,26aB	0,39aA		
10 mmol L ⁻¹	1062,21aB	1184,20aA	0,37aA	0,34aA	4248,93aA	3827,52aB	0,53aA	0,47aB	0,26aB	0,40aA		
DMS (Si)	92,72		0,04		479,11		0,06		0,02			
DMS (N)	76,91		0,04		397,39		0,05		0,02			

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Notou-se que as plantas da “Tsubasa” sob N nítrico, obtiveram maior área e matéria seca de raízes em relação às da “Hokushin”, contudo, sob N amoniacal, não houve diferenças entre as variedades para área da raiz, entretanto, para matéria seca das raízes a “Tsubasa” apresentou maiores valores (Tabela 19). Ressalta-se que ambas as variedades apresentaram maior área e matéria seca das raízes sob a fonte de N nítrica, devido o excesso de nitrato não ocasionar toxicidade às plantas de pepino, no entanto a fonte de N amoniacal ocasiona redução ao desenvolvimento das raízes (ROOSTA; SCHJOERRING, 2007).

Tabela 19. Efeito da interação variedades e fontes de N para área e matéria seca (M.S.) da raiz de plantas de pepino.

Variedades (V)	NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻	
	Área raiz mm ²		M.S. raiz g por planta	
Hokushin	998,99 aB	1093,26bA	0,20bB	0,34bA
Tsubasa	1027,44aB	1289,84aA	0,22aB	0,44aA
DMS (V)	62,80		0,01	
DMS (N)	62,80		0,01	

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.2.3. Variáveis fisiológicas, morfológica e atividade da redutase do nitrato

O índice de cor verde da terceira folha (ICV 3), da quarta folha (ICV 4) e da quinta folha (ICV 5) apresentaram efeitos ($P < 0,01$) para a interação variedades e fontes de N e entre fontes de N e concentrações de silício (Tabela 20).

Para o número de estômatos, houve efeito ($P < 0,05$) apenas entre variedades, sendo que a “Tsubasa” obteve o maior número em relação a “Hokushin”. Embora sejam relatadas alterações na condutância estomática com o uso de altas concentrações de amônio (LOPES; ARAUS, 2006), não foi observado efeito entre as fontes de N e interações (Tabela 20).

Apesar de o Si promover alterações na anatomia das folhas, aumentando a espessura, a área foliar (FARSHIDI; ABDOLZADEH; SADEGHIPOUR, 2012) e a condutância estomática em plantas sob condições de estresse (ALI et al., 2013; SHI et al., 2013), não foi verificado efeito das concentrações de Si e interações para o número de estômatos (Tabela 20).

Tabela 20. Índice de cor verde da terceira (ICV 3), quarta (ICV 4) e quinta (ICV 5) folha a partir do ápice da planta, número de estômatos e atividade da redutase do nitrato de plantas de duas variedades de pepino em função da aplicação de silício e de nitrogênio.

Variedades (V)	ICV 3	ICV 4	ICV 5	Número de estômatos	Redutase do nitrato $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$
Hokushin	27,24	27,09	27,13	44,92b	42,20a
Tsubasa	30,67	29,66	29,52	49,08a	36,88b
DMS	0,89	0,83	0,89	3,80	1,52
Si (Si)					
0 mmol L ⁻¹	25,67	25,15	24,54	47,12	39,69
1 mmol L ⁻¹	30,62	30,14	30,38	46,75	39,58
10 mmol L ⁻¹	30,58	29,83	30,05	47,13	39,36
DMS	1,31	1,23	1,31	5,62	2,26
Nitrogênio (N)					
NO ₃ ⁻	31,63	31,12	32,34	46,50	-
NH ₄ ⁺	26,28	25,63	24,31	47,50	-
DMS	0,89	0,83	0,89	3,80	-
----- Teste F -----					
V	61,81 ^{**}	39,39 ^{**}	29,76 ^{**}	4,93 [*]	53,90 ^{**}
Si	56,58 ^{**}	61,73 ^{**}	74,39 ^{**}	0,02 ^{ns}	0,07 ^{ns}
N	149,73 ^{**}	179,01 ^{**}	334,59 ^{**}	0,28 ^{ns}	-
V x N	25,61 ^{**}	22,22 ^{**}	44,99 ^{**}	0,39 ^{ns}	-
V x Si	0,04 ^{ns}	1,37 ^{ns}	0,95 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,04 ^{ns}
N x Si	36,96 ^{**}	47,39 ^{**}	54,50 ^{**}	0,73 ^{ns}	-
V x N x Si	1,78 ^{ns}	0,35 ^{ns}	1,32 ^{ns}	1,33 ^{ns}	-
CV (%)	5,2	5,0	5,4	13,8	4,5

*, ** e ^{ns}: significativo (P<0,05), (P<0,01) e não significativo, pelo teste F, respectivamente.

A atividade da enzima redutase do nitrato apresentou efeito (P<0,01) para variedades, sendo maior na “Hokushin” do que na “Tsubasa”. Contudo, para concentrações de Si e a interação variedades e concentrações de Si, não houve efeito significativo (Tabela 20). Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Bybordi (2010), em estudos envolvendo Si e nitrato em plantas de canola (*Brassica napus* L.).

A “Tsubasa” sob N amoniacal apresentou maiores índices de cor verde (ICV) em todas as folhas, em relação a “Hokushin”. Entretanto, sob N nítrico não houve diferenças entre variedades para os índices de cor verde (Tabela 21).

Contudo, os índices de cor verde foram maiores em ambas as variedades sob N nítrico do que o amoniacal, estes resultados podem ser atribuídos, devido o excesso de amônio ocasionar diminuição nos teores de clorofila (WANG et al., 2010) tendo como conseqüência clorose das folhas (WONG, 2005) e aumento da síntese de putrescina, evoluindo em necrose do tecido foliar (PRADO, 2008), resultados

semelhantes ao encontrado neste trabalho (Figura 9- Apêndice) de maneira que esses danos foliares, refletiram em menores índices de cor verde (Tabela 21).

Tabela 21. Efeito das interações entre variedades, silício e nitrogênio para índice de cor verde da terceira (ICV 3), quarta (ICV 4) e quinta (ICV 5) folha a partir do ápice da planta, de duas variedades de pepino em função da aplicação de silício e de nitrogênio.

Variedades (V)	Nitrogênio (N)					
	ICV 3		ICV 4		ICV 5	
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
Hokushin	23,45bB	31,02aA	23,37bB	30,80aA	21,64bB	32,61aA
Tsubasa	29,10aB	32,24aA	27,88aB	31,44aA	26,98aB	32,06aA
DMS (V)	1,25		1,18		1,26	
DMS (N)	1,25		1,18		1,26	
Silício (Si)						
0 mmol L ⁻¹	20,34bB	30,99aA	19,58bB	30,73aA	17,31bB	31,78aA
1 mmol L ⁻¹	29,48aB	31,76aA	28,73aB	31,56aA	27,70aB	33,06aA
10 mmol L ⁻¹	29,01aB	32,14aA	28,58aB	31,08aA	27,93aB	32,18aA
DMS (Si)	1,85		1,74		1,86	
DMS (N)	1,54		1,44		1,54	

Letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

O uso do Si promoveu incrementos nos ICV de plantas sob N amoniacal, não havendo diferenças entre as concentrações 1 e 10 mmol L⁻¹ do elemento benéfico (Tabela 21). Estes resultados podem ser explicados, devido o Si promover efeitos protetores aos mecanismos fotossintéticos, e no equilíbrio dos nutrientes (MATEOS-NARANJO; ANDRADES-MORENO; DAVY, 2013), aumentando a atividade antioxidante dos vegetais, diminuindo a peroxidação lipídica das folhas (JIAO-JING et al., 2009). Estes efeitos contribuem para manter as folhas fotossinteticamente ativas, mitigando, assim, os efeitos danosos da toxicidade de amônio aos vegetais, refletindo em aumento da síntese de clorofila e da fotossíntese, conseqüentemente no ICV.

No entanto, o uso do elemento benéfico não exerceu efeitos nos ICV nas plantas sob N nítrico (Tabela 21). O fato de o Si ter beneficiado apenas as plantas sob o excesso de amônio, é explicado devido o excesso de nitrato não ocasionar toxicidade às plantas de pepino, apenas o de amônio (ROOSTA; SCHJOERRING, 2007).

5. CONCLUSÕES

O uso do Si em ambas as variedades de cana-de-açúcar e de pepino mitiga a toxicidade de amônio proporcionando maiores acúmulos de matéria seca de plantas; entretanto, não beneficia as plantas sob excesso de N nítrico.

6. REFERÊNCIAS

- ALI, S.; FAROOQ, M. A.; YASMEEN, T.; HUSSAIN, S.; ARIF, M. S.; ABBAS, F.; BHARWANA, S. A.; ZHANG, G. The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Maryland Heights, v. 89, n. 1, p. 66–72, 2013.
- AQUINO, L. A.; PUIATTI, M.; PEREIRA, P. R. G.; PEREIRA, F. H. F.; LADEIRA, I. R.; CASTRO, M. R. S. Produtividade, qualidade e estado nutricional da beterraba de mesa em função de doses de nitrogênio. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 2, p. 199-203, 2006.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1983, 48p. (Boletim Técnico, 78).
- BORGOGNONE, D.; COLLA, G.; ROUPHAEL, Y.; CARDARELLI, M.; REA, E.; SCHWARZ, D. Effect of nitrogen form and nutrient solution pH on growth and mineral composition of self-grafted and grafted tomatoes. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 149, n. 1, p. 61–69, 2013.
- BRITTO, D. T.; KRONZUCKER, H. J. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v.159, n. 6, p. 567–584, 2002.
- BRITTO, D. T.; SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M.; KRONZUCKER, H. J. Futile Transmembrane NH_4^+ Cycling: A Cellular Hypothesis to Explain Ammonium Toxicity in Plants. **National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 98, n. 7, p. 4255-4258, 2001.
- BUCHANAN, B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. Biochemistry & molecular biology of plants. In: CRAWFORD, N. M.; KAHN, M. L.; LEUSTEK, T.; LONG, S. R. **Nitrogen and sulfur**. Maryland: American Society of Plant Biologists, 2000. cap. 16, p. 786-849.
- BYBORDI, A. Influence of $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$ ratios and silicon on growth, nitrate reductase activity and fatty acid composition of canola under saline conditions. **African Journal of Agricultural Research**, Nairóbi, v. 5, n. 15, p. 1984-1992, 2010.

BYBORDI, A. Effect of ascorbic acid and silicium on photosynthesis, antioxidant enzyme activity, and fatty acid contents in canola exposure to salt stress. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 11, n. 10, p. 1610-1620, 2012.

CAZETTA, J. O.; VILLELA, L. C. V. Nitrate reductase activity in leaves and stems of tanner grass (*Brachiaria radicans* Napper). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 6, p. 640-648, 2004.

CHEN, B. M.; WANG, Z. H.; LI, S. X.; WANG, G. X.; SONG, H. X.; WANG, X. N. Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables. **Plant Science**, Limerick, v. 167, n. 3, p. 635–643, 2004.

CRUZ, C.; DOMÍNGUEZ-VALDIVIA, M. D.; APARICIO-TEJO, P. M.; LAMSFUS, C.; BIO, A.; MARTINS-LOUÇÃO, M. A.; MORAN, J. F. Intra-specific variation in pea responses to ammonium nutrition leads to different degrees of tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 70, n. 3, p. 233–243. 2011.

CRUZ, C.; BIO, A. F. M.; DOMÍNGUEZ-VALDIVIA, M. D.; APARICIO-TEJO, P. M.; LAMSFUS, C.; MARTINS-LOUÇÃO, M. A. How does glutamine synthetase activity determine plant tolerance to ammonium? **Planta**, Heidelberg, v. 223, n. 5, p. 1068–1080, 2006.

CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A. Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched. **Water Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v.197, n. 4, p. 323–330, 2009.

DOMÍNGUEZ-VALDIVIA, M. D.; APARICIO-TEJO, P. M.; LAMSFUS, C.; CRUZ, C.; MARTINS-LOUÇÃO, M. A.; MORAN, J. F. Nitrogen nutrition and antioxidant metabolism in ammonium-tolerant and sensitive plants. **Physiologia Plantarum**, Malden, v. 132, n. 3, p. 359–369, 2008.

DOUBNEROVÁ, V.; RYSLAVÁ, H. What can enzymes of C4 photosynthesis do for C3 plants under stress? **Plant Science**, Limerick, v. 180, n. 4, p. 575–583. 2011.

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

FARSHIDI, M.; ABDOLZADEH, A.; SADEGHIPOUR, H. R. Silicon nutrition alleviates physiological disorders imposed by salinity in hydroponically grown canola (*Brassica napus* L.) plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 34, n. 5, p. 1779–1788, 2012.

FAUTEUX, F.; RÉMUS-BOREL, W.; MENZIES, J. G.; BÉLANGER, R. R. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. **FEMS Microbiology Letters**, West Sussex, v. 249, n. 1, p. 1-6, 2005.

FENG, J.; SHI, Q.; WANG, X.; WEI, M.; YANG, F.; XU, H. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 123, n. 4, p. 521–530, 2010.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

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

GERENDÁS, J.; ZHU, Z.; BENDIXEN, R.; RATCLIFFE, R. G.; SATTELMACHER, B. Physiological and biochemical processes related to ammonium toxicity in higher plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 160, n. 2, p. 239–251, 1997.

GUNES, A.; INAL, A.; BAGCI, E. G.; COBAN, S.; PILBEAM, D.J. Silicon mediates changes to some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown under B toxicity. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 113, n. 2, p. 113-119, 2007.

HATTORI, T.; SONOBE, K.; INANAGA, S.; ANA, P.; TSUJI, W.; ARAKI, H.; ENEJI, A. E.; MORITA, S. Short term stomatal responses to light intensity changes and osmotic stress in sorghum seedlings raised with and without silicon. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 60, n. 2, p. 177–182, 2007.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. p. 347.

HOOPEN, F. T.; CUIN, T. A.; PEDAS, P.; HEGELUND, J. N.; SHABALA, S.; SCHJOERRING, J. K.; JAHN, T. P. Competition between uptake of ammonium and potassium in barley and Arabidopsis roots: molecular mechanisms and physiological consequences. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, n. 9, p. 2303–2315, 2010.

HOSSAIN, M. T.; MORI, R.; SOGA, K.; WAKABAYASHI, K.; KAMISAKA, S.; FUJII, S.; YAMAMOTO, R.; HOSON, T. Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other *Poaceae* seedlings. **Journal of Plant Research**, Tokyo, v. 115, n. 1, p. 23–27, 2002.

HORCHANI, F.; HAJRI, R.; ASCHI-SMITI, S. Is the sensitivity to ammonium nutrition related to nitrogen accumulation? **Current Botany**, Vidyanagar, v. 2, n. 1, p. 18-22, 2011.

INAL, A.; PILBEAM, D. J.; GUNES, A. Silicon increases tolerance to boron toxicity and reduces oxidative damage in barley. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 32, n. 1, p. 112-128, 2009.

ISHIKAWA, S.; ANDO, S.; SAKAIGAICHI, T.; TERAJIMA, Y.; MATSUOKA, M. Effects of high nitrogen application on the dry matter yield, nitrogen content and nitrate-N concentration of sugarcane. **Soil Science and Plant Nutrition**, Singapore, v. 55, n. 4, p. 485–495, 2009.

JAMPEETONG, A.; BRIX, H. Effects of NH_4^+ concentration on growth, morphology and NH_4^+ uptake kinetics of *Salvinia natans*. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 35, n. 5, p. 695–702, 2009.

JAMPEETONG, A.; BRIX, H.; KANTAWANICHKUL, S. Response of *Salvinia cucullata* to high NH_4^+ concentrations at laboratory scales. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Maryland Heights, v. 79, n. 1, p. 69–74, 2012.

JIAO-JING, L.; SHAO-HANG, L.; PEI-LEI, X.; XIU-JUAN, W.; JI-GANG, B. Effects of Exogenous Silicon on the Activities of Antioxidant Enzymes and Lipid Peroxidation in Chilling-Stressed Cucumber Leaves. **Agricultural Sciences in China**, Beijing, v. 8, n. 9, p. 1075-1086, 2009.

KONNERUP, D.; BRIX, H. Nitrogen nutrition of *Canna indica*: Effects of ammonium versus nitrate on growth, biomass allocation, photosynthesis, nitrate reductase activity and N uptake rates. **Aquatic Botany**, Amsterdam, v. 92, n. 2, p. 142–148, 2010.

KOTSIRAS, A.; OLYMPIOS, C. M.; PASSAM, H. C. Effects of Nitrogen Form and Concentration on Yield and Quality of Cucumbers Grown on Rockwool During Spring and Winter in Southern Greece. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 28, n. 11, p. 2027–2035, 2005.

KOTSIRAS, A.; OLYMPIOS, C. M.; DROSOPOULOS, J.; PASSAM, H. C. Effects of nitrogen form and concentration on the distribution of ions within cucumber fruits. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 95, n. 3, p. 175–183, 2002.

KRASKA, J. E.; BREITENBECK G. A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 41, n. 17, p. 2075-2085, 2010.

LASA, B.; FRECHILLA, S.; ALEU, M.; GONZÁLES-MORO, B.; LAMSFUS, C.; APARICIO-TEJO, P. M. Effects of low and high levels of magnesium on the response of sunflower plants grown with ammonium and nitrate. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 225, n. 2, p. 167–174, 2000.

LASA, B.; FRECHILLA, S.; LAMSFUS, C.; APARICIO-TEJO, P. M. The sensitivity to ammonium nutrition is related to nitrogen accumulation. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 91, n. 2, p.143-152, 2001.

LASA, B.; FRECHILLA, S.; APARICIO-TEJO, P. M.; LAMSFUS, C. Role of glutamate dehydrogenase and phosphoenolpyruvate carboxylase activity in ammonium nutrition tolerance in roots. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 40, n. 11, p. 969–976, 2002.

LIANG, Y.; SI, J; ROMHELD, V. Silicon uptake and transport is an active process in *Cucumis sativus*. **New Phytologist**, Oxford, v.167, n. 3, p.797-804, 2005.

LIANG, Y.; SUN, W.; ZHU, Y.G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution**, Barking, v. 147, n. 2, p. 422-428, 2007.

LIMA, M. A.; CASTRO, V. F.; VIDAL, J. B.; ENÉAS-FILHO, J. Aplicação de silício em milho e feijão-de-corda sob estresse salino. **Revista Ciência Agronômica**, Cariri, v. 42, n. 2, p. 398-403, 2011.

LOPES, M. S.; ARAUS, J. L. Nitrogen source and water regime effects on durum wheat photosynthesis and stable carbon and nitrogen isotope composition. **Physiologia Plantarum**, Malden, v. 126, n. 3, p. 435–445, 2006.

LOPES, M. S.; ARAUS, J. L. Comparative genomic and physiological analysis of nutrient response to NH_4^+ , $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ and NO_3^- in barley seedlings. **Physiologia Plantarum**, Malden, v. 134, n. 1, p. 134–150, 2008.

LOQUÉ, D.; WIRÉN, N. V. Regulatory levels for the transport of ammonium in plant roots. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 401, p. 1293-1305, 2004.

MA, J. F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, Singapore, v. 50, n. 1, p. 11-18, 2004.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, Limerick, v. 11, n. 8, p. 392-397, 2006.

MAGALHÃES, J. R.; HUBER, D. M. Ammonium assimilation in different plant species as affected by nitrogen form and pH control in solution culture. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 21, n. 1, p. 1-6, 1989.

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

MATEOS-NARANJO, E.; ANDRADES-MORENO, L.; DAVY, A. J. Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 63, n. 1, p. 115-121, 2013.

NEUBERG, M.; PAVLÍKOVÁ, D.; PAVLÍK, M.; BALÍK, J. The effect of different nitrogen nutrition on proline and asparagine content in plant. **Plant Soil Environment**, Praga, v. 56, n. 7, p. 305–311, 2010.

PRABAGAR, S.; HODSON, M. J.; EVANS, D. E. Silicon amelioration of aluminium toxicity and cell death in suspension cultures of Norway spruce (*Picea abies* (L.) *Karst.*). **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 70, n. 3, p. 266–276, 2011.

PRADO, R. M. Nitrogênio. In:_____. **Nutrição de plantas**. Jaboticabal: Editora UNESP, 2008. cap. 4, p. 83-120.

ROOSTA, H. R.; SCHJOERRING, J. K. Effects of Ammonium Toxicity on Nitrogen Metabolism and Elemental Profile of Cucumber Plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 30, n. 11, p. 1933-1951, 2007.

ROOSTA, H. R.; SCHJOERRING, J. K. Effects of nitrate and potassium on ammonium toxicity in cucumber plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 31, n. 7, p. 1270–1283, 2008a.

ROOSTA, H. R.; SCHJOERRING, J. K. Root carbon enrichment alleviates ammonium toxicity in cucumber plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 31, n. 5, p. 941–958, 2008b.

ROOSTA, H. R.; SAJJADINIA, A.; RAHIMI, A.; SCHJOERRING, J. K. Responses of cucumber plant to NH_4^+ and NO_3^- nutrition: The relative addition rate technique vs. cultivation at constant nitrogen concentration. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 121, n. 4, p. 397–403, 2009.

SÁNCHEZ, E.; RIVERO, R. M.; RUIZ, J. M.; ROMERO, L. Changes in biomass, enzymatic activity and protein concentration in roots and leaves of green bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Strike) under high NH_4NO_3 application rates. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 99, n. 4, p. 237–248, 2004.

SANTAMARIA, P. Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, West Sussex, v. 86, n. 1, p. 10–17, 2006.

SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: A review. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1999.

SCHORTEMAYER, M.; FEIL, B.; STAMP, P. Root morphology and nitrogen uptake of maize simultaneously supplied with ammonium and nitrate in split-root system. **Annals of botany**, Oxford, v. 72, n. 2, p. 107-115, 1993.

SCHORTEMAYER, M.; STAMP, P.; FEIL, B. Ammonium tolerance and carbohydrate status in maize cultivars. **Annals of Botany**, Oxford, v. 79, n. 1, p. 25-30, 1997.

SHEN, X.; ZHOU, Y.; DUAN, L.; LI, Z.; ENEJI, A. E.; LI, J. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 167, n. 15, p. 1248–1252, 2010.

SHI, Y.; WANG, Y.; FLOWERS, T. J.; GONG, H. Silicon decreases chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 170, n. 9, p. 847–853, 2013.

SILVA, P. C. C.; COUTO, J. L.; SANTOS, A. R. Absorção dos íons amônio e nitrato e seus efeitos no desenvolvimento do girassol em solução nutritiva. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 97-104, 2010.

SILVA, O. N.; LOBATO, A. K. S.; ÁVILA, F. W.; COSTA, R. C. L.; OLIVEIRA NETO, C. F.; SANTOS FILHO, B. G.; MARTINS FILHO, A. P.; LEMOS, R. P.; PINHO, J. M.; MEDEIROS, M. B. C. L.; CARDOSO, M. S.; ANDRADE, I. P. Silicon-induced increase in chlorophyll is modulated by the leaf water potential in two water-deficient tomato cultivars. **Plant Soil Environment**, Praga, v. 58, n. 11, p. 481–486, 2012.

SILVEIRA, J. A. G.; CROCOMO, O. J. Assimilação de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em presença de elevado nível de N e de vinhaça no solo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Brasília, v. 2, n. 1, p. 7-15, 1990.

SU, S.; ZHOU, Y.; QIN, J.G.; WANG, W.; YAO, W.; SONG, L. Physiological responses of *Egeria densa* to high ammonium concentration and nitrogen deficiency. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 86, n. 5, p. 538–545, 2012.

VACULÍK, M.; LUX, A.; LUXOVÁ, M.; TANIMOTO, E.; LICHTSCHEIDL, I. Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 52–58, 2009.

WANG, C.; SONG, H. Z.; PEI F. W.; WEI, L.; JIE, L. Effects of ammonium on the anti oxidative response in *Hydrilla Verticillata* (L.f.) Royle plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Maryland Heights, v. 73, n. 2, p. 189–195, 2010.

WONG, M. Visual symptoms of plant nutrient deficiencies in nursery and landscape plants. **Soil and Crop Management**, Quebec, v. 1, n. 1, p. 1-4, 2005.

ZHU, Z.; GERENDÁS, J.; BENDIXEN, R.; SCHINNER, K.; TABRIZI, H.; SATTELMACHER, B.; HANSEN, U. P. Different tolerance to light stress in NO_3^- and NH_4^+ grown *Phaseolus vulgaris* L. **Plant biology**, Stuttgart, v. 2, n. 5, p. 558–570, 2000.

ZHU, Z.; WEI, G.; LI, J.; QIAN, Q.; YU, J. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, Limerick, v. 167, n. 3, p. 527-533, 2004.

APÊNDICES



Figura 1. Casa de vegetação utilizada para o desenvolvimento do experimento, FCAV/Unesp, Jaboticabal-SP, 2012.

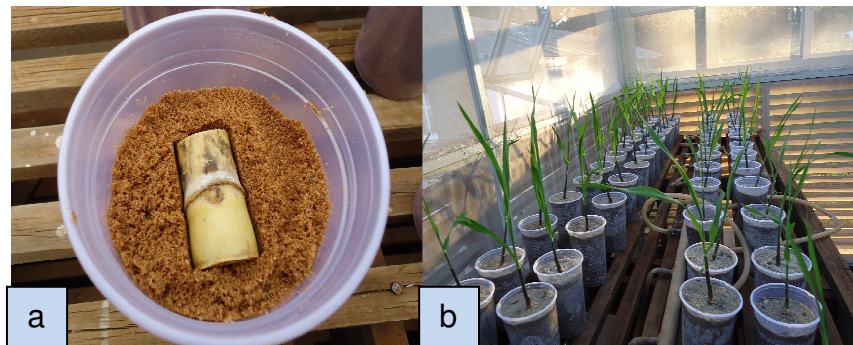


Figura 2. Tolete contido em recipientes plásticos ($0,5 \text{ dm}^{-3}$) preenchido com areia lavada (a), mudas de plantas de cana-de-açúcar com dois pares de folhas desenvolvidas (b), FCAV/Unesp, Jaboticabal-SP, 2012.



Figura 3. Mudas de pepino com três folhas desenvolvidas, em bandejas de isopor preenchidas com substrato Bioplant[®]; FCAV/Unesp, Jaboticabal-SP, 2013.

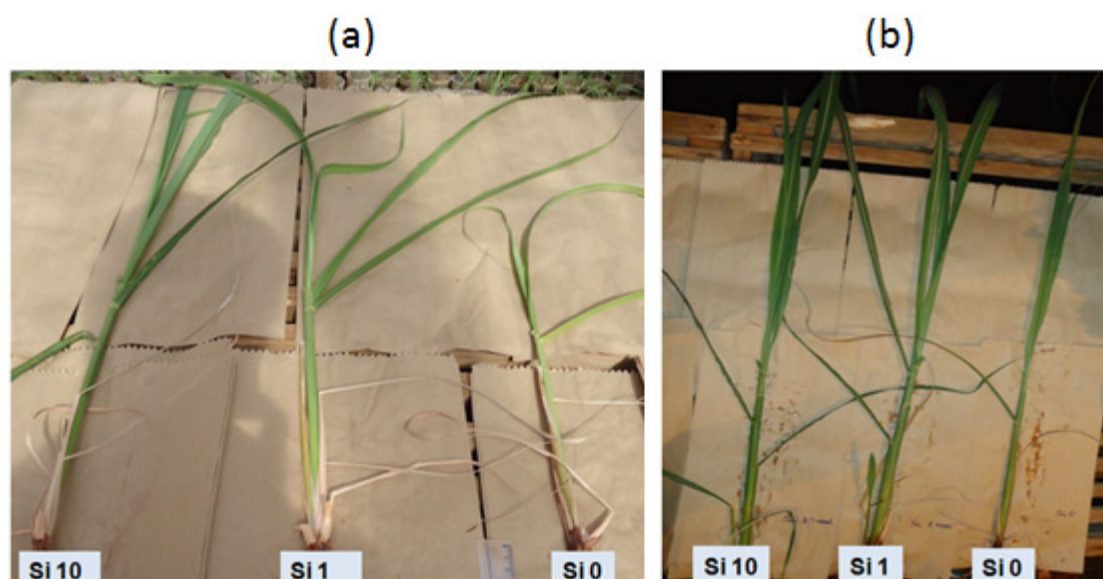


Figura 4. Foto indicando a altura de plantas de cana-de-açúcar cultivadas com concentrações de Si (0; 1 e 10 mmol L⁻¹) e 60 mmol L⁻¹ de amônio (a) e com 60 mmol L⁻¹ de nitrato (b); FCAV/Unesp, Jaboticabal-SP, 2012.

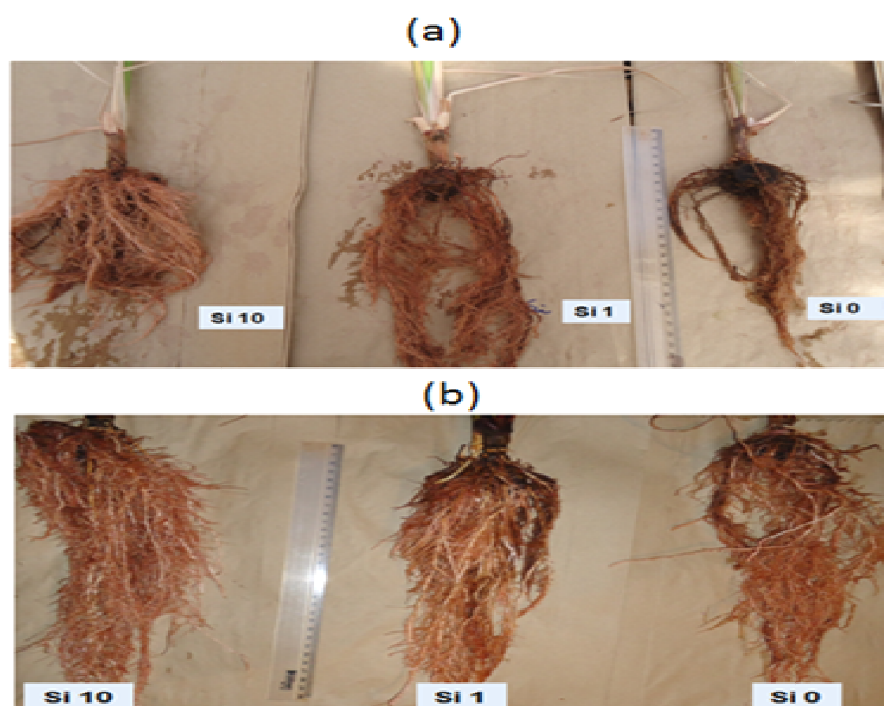


Figura 5. Foto indicando o volume de raízes de plantas de cana-de-açúcar cultivadas com concentrações de Si (0; 1 e 10 mmol L⁻¹) e 60 mmol L⁻¹ de amônio (a) e com 60 mmol L⁻¹ de nitrato (b); FCAV/Unesp, Jaboticabal-SP, 2012.

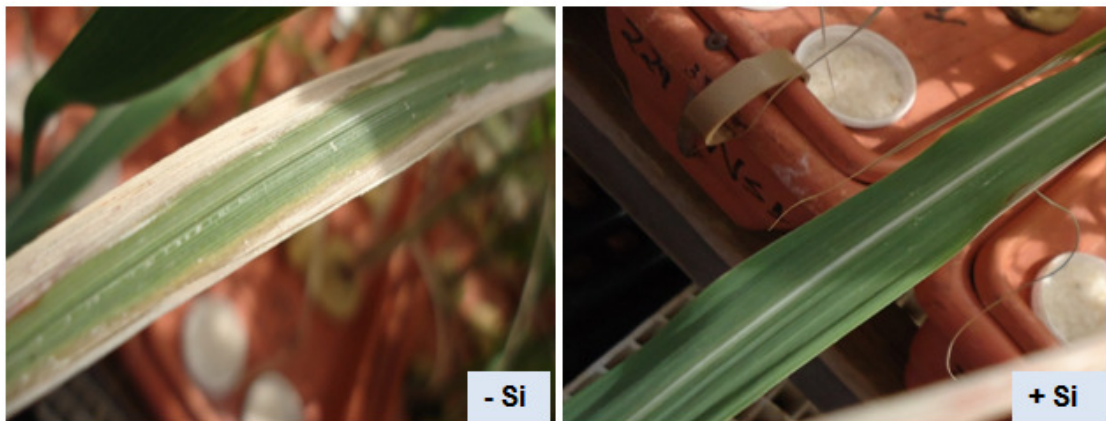


Figura 6. Sintomatologia de folhas de cana-de-açúcar cultivada com 60 mmol L^{-1} de amônio na ausência (-Si) e na presença (+Si) na concentração de 1 mmol L^{-1} ; FCAV/Unesp, Jaboticabal-SP, 2012.

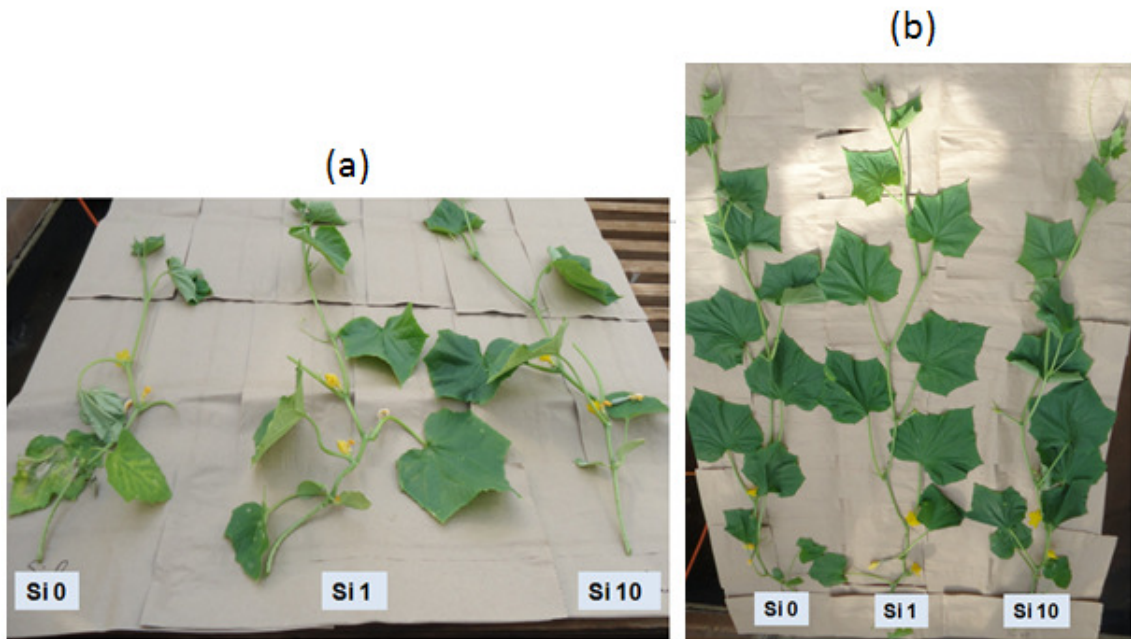


Figura 7. Foto indicando a altura de plantas de pepino cultivadas com concentrações de Si (0; 1 e 10 mmol L^{-1}) e 60 mmol L^{-1} de amônio (a) e com 60 mmol L^{-1} de nitrato (b); FCAV/Unesp, Jaboticabal-SP, 2013.

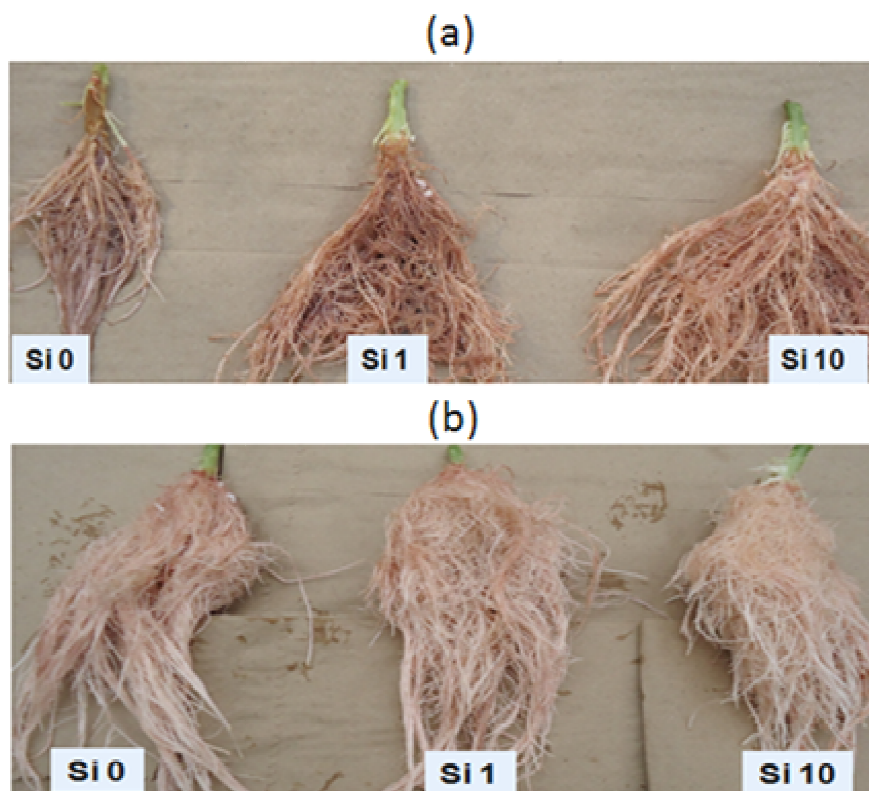


Figura 8. Foto indicando o volume de raízes de plantas de pepino cultivadas com concentrações de Si (0; 1 e 10 mmol L⁻¹) e 60 mmol L⁻¹ de amônio (a) e com 60 mmol L⁻¹ de nitrato (b); FCAV/Unesp, Jaboticabal-SP, 2013.

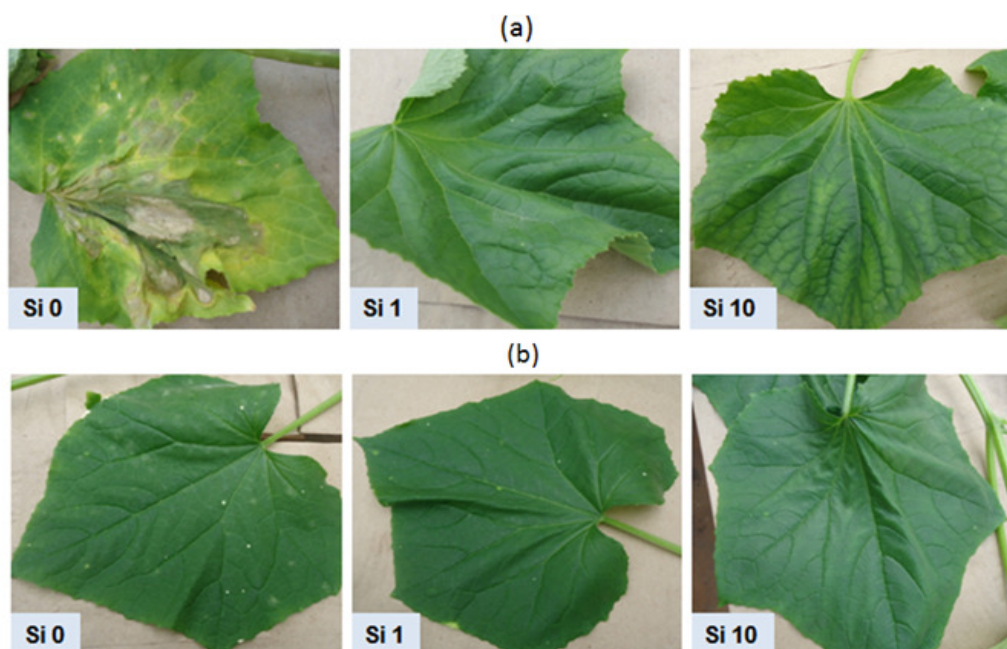


Figura 9. Sintomatologia de folhas de pepino cultivadas com concentrações de Si (0; 1 e 10 mmol L⁻¹) e 60 mmol L⁻¹ de amônio (a) e com 60 mmol L⁻¹ de nitrato (b); FCAV/Unesp, Jaboticabal-SP, 2013.