



Márcio de Souza Dias

**Alterações metabólicas induzidas pelo silício em plantas de pimentão
cultivadas sob estresse salino**

**Alfenas – MG
2019**

Márcio de Souza Dias

**Alterações metabólicas induzidas pelo silício em plantas de pimentão
cultivadas sob estresse salino**

Tese apresentada à Universidade José do Rosário
Vellano – UNIFENAS, como parte das exigências
do programa de pós-graduação em Agricultura
Sustentável para obtenção do título de *Doutor*.

Orientador: Prof. Dr. Douglas José Marques

Coorientador: Prof. Dr. Hudson Carvalho Bianchini

**Alfenas – MG
2019**

Dados internacionais de catalogação-na-publicação
Biblioteca Central da UNIFENAS

Dias, Márcio de Souza

Alterações metabólicas pelo silício em plantas de pimentão cultivadas sob estresse salino. — Márcio de Souza Dias. —Alfenas, 2019.

71 f.

Orientador: Prof. Dr. Douglas José Marques
Tese (Doutorado)- Programa de Pós-graduação
em Agricultura Sustentável - Universidade José do Rosário Vellano ,
Alfenas, 2019

1. Estresse abiótico 2. Fotossíntese 3. Produtividade 4. Silicato de cálcio I. Universidade José do Rosário Vellano II. Título

CDU : 633.842(043)

Zélia Fernandes Ferreira Miranda

Bibliotecária CRB6 1486

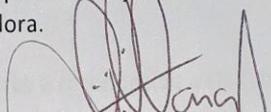
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

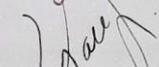
Título: "ALTERAÇÕES METABÓLICAS INDUZIDAS PELO SILÍCIO EM PLANTAS DE PIMENTÃO CULTIVADAS SOB ESTRESSE SALINO".

Autor: Márcio de Souza Dias

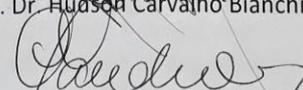
Orientador: Prof. Dr. Douglas Jose Marques

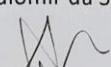
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de **DOUTOR EM AGRICULTURA SUSTENTÁVEL** pela Comissão Examinadora.


Prof. Dr. Douglas Jose Marques
Orientador


Prof. Dr. José Sérgio Araujo


Prof. Dr. Hudson Carvalho Bianchini


Prof. Dr. Claudiomir da Silva dos Santos


Profa. Dra. Andressa Santanna Natel

Alfenas, 02 de setembro de 2019


Profa. Dra. Laura Helena Orfão
Diretora de Pesquisa e Pós-graduação
UNIFENAS

Primeiramente a Deus, por estar presente em todos os momentos da minha vida e por me guiar nesta caminhada. Ao meu querido pai (in memoriam), que foi um exemplo de homem e família. À minha mãe, que sempre acreditou em mim, à minha irmã, esposa e filhos pelo apoio companheirismo e carinho.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade José do Rosário Vellano - UNIFENAS, ao programa de pós-graduação em Agricultura Sustentável, pelas instalações, e na figura das pessoas, a todos os funcionários, professores e colegas do curso de pós-graduação, que me receberam com respeito, pelos ensinamentos e agradável convivência.

Ao meu orientador, Professor Dr. Douglas José Marques pela oportunidade, pelos ensinamentos e confiança.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG / Brasil) pelo financiamento deste projeto e a concessão de bolsa de doutorado e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq / Brasil), pela produtividade do orientador.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Douglas José Marques, Dr. Hudson Carvalho Bianchini, Dra. Andressa Santanna Natel, Dr. José Sérgio Araújo e Dr. Claudiomir da Silva Santos pela disponibilidade, contribuições e sugestões apresentadas.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Microbiologia do Solo, pelos ensinamentos, auxílio no cumprimento das atividades, pelo apoio, conselhos, incentivo e amizade, em especial aos funcionários Luciana Rosa Alves Rufino, Lucimara Silva, César A. Cunha, José Lionel Perciliano

Aos colegas do curso de pós-graduação, Kleso Silva Franco Júnior (Unifenas); Valdir Veroneze Júnior (Unifal) e ao colega do curso de graduação em Agronomia (Unifenas) Pablo Francisco Alcântara, pela amizade, companheirismo, pelo auxílio na condução do experimento e pela ótima convivência.

Aos amigos Tânia Venga, Nilton Oliveira Silva, Alexandra Maria Dias, Marli Woelbert, Claudiomir da Silva dos Santos, Nádia Cristina S. Mello, Camila Chioda de Almeida, Teresinha de Souza Tavares, Elisângela Santos, Flávio Caixeta, Ricardo Caixeta, Anna Maria Silveira Mendes, Damaris Martins de Oliveira Krauss, Flávio Lopes Azola, Célia Regina Faria Fonseca Dias, Pastor Carlos Roberto Pereira Silva pelo apoio, incentivo e pela amizade.

A todos os meus queridos professores do curso de pós-graduação, pelo apoio, incentivo, ensinamentos, conselhos e carinho.

Ao meu companheiro, amigo, referência e pai, Maurício Cândido Dias (*in memoriam*), que sempre estará comigo, por todo amor, dedicação e ensinamentos; à minha mãe, Anair de

Melo Dias, à minha querida e amada irmã Vera Lúcia de Souza Dias, pelo incentivo e companheirismo, e à minha tia Rosângela Nannetti Dias, pela compreensão, incentivo e carinho.

À minha esposa Juliana Ramalho Bolognani Dias, pelo carinho, amor e paciência ao longo de toda esta caminhada, e aos meus queridos e amados filhos, Márcio Vinícius Bolognani Dias e Carlos Eduardo Bolognani Dias, por todas as vezes que sentia o fardo pesado e eles me recompensavam com um olhar, um abraço, um sorriso.

Muito obrigado.

"Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer" (A. Einstein)

RESUMO

O objetivo com esta pesquisa foi investigar alternativas para amenizar os efeitos da salinidade do solo na cultura do pimentão (*Capsicum annuum* L.), avaliando fatores de produção e trocas gasosas. Foram conduzidos dois experimentos no setor de Olericultura e Experimentação do Departamento de Agronomia da Universidade José do Rosário Vellano (Unifenas), Alfenas, MG. Utilizou-se a cultivar de pimentão Magali R, cujas mudas foram produzidas em bandejas e transplantadas após 35 dias, em que cada vaso (19 dm^3) recebeu uma planta. Os experimentos foram dispostos em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial, com cinco repetições cada, sendo o primeiro 2×5 (duas fontes de corretivo: calcário e silicato de cálcio) e cinco doses crescentes de KCl ($150, 300, 450, 600$ e 700 kg ha^{-1} de K_2O), nos quais foram avaliados a condutividade elétrica (CE), teor de silício (Si) no solo e na planta (folha), fotossíntese líquida, condutância estomática, concentração intercelular de CO_2 , transpiração, eficiência do uso da água e instantânea de carboxilação, além da produção, massa, comprimento e diâmetro do fruto e altura das plantas. O segundo experimento 2×2 (duas fontes de corretivo: calcário e silicato de cálcio) e duas doses de KCl (controle: equivalente a 150 kg ha^{-1} e estresse salino 700 kg ha^{-1} de K_2O) em que foram avaliados a CE, a translocação do Si na planta, eficiência do uso da água e instantânea da carboxilação e índice de estresse. Os resultados encontrados nas diferentes avaliações foram submetidos à análise de variância. Para avaliação das médias, foram aplicados os testes de Scott-Knott (primeiro experimento) e Tukey (segundo experimento). Os desvios padrões foram calculados e aplicados os estimadores de correlação (Pearson), usando o software SISVAR. Concluiu-se que a dose de 300 kg ha^{-1} de K_2O , na presença de silicato de cálcio, proporcionou a maior translocação de Si, os melhores resultados para a condutividade elétrica de $2,76 \text{ dS m}^{-1}$, teor de Si no solo de $5,70 \text{ mg kg}^{-1}$, 14% de teor foliar de Si, melhorando as taxas fotossintéticas e transpiração, aumentando a eficiência no uso da água, a eficiência instantânea da carboxilação e a produção de frutos, reduzindo o índice de estresse. O aumento da salinidade reduziu a produção de frutos, na presença e ausência de Si.

Palavras-chave: Estresse abiótico, fotossíntese, produtividade, silicato de cálcio.

ABSTRACT

The objective of this research was to investigate alternatives to mitigate the effects of soil salinity on sweet pepper (*Capsicum annuum* L.), by evaluating production factors and gas exchange. Two experiments were conducted in the Olericulture and Experimentation sector of the Department of Agronomy of the University of José do Rosario Vellano (Unifenas), Alfenas, MG. Magali R pepper cultivar was used, whose seedlings were produced in trays and transplanted after 35 days, where each pot (19 dm³) received a plant. The experiments were arranged in a randomized block design in a factorial scheme with five replications each, the first 2 × 5 (two corrective sources: limestone and calcium silicate) and five increasing doses of KCl (150, 300, 450, 600 and 700 kg ha⁻¹ of K₂O), where were evaluated the electrical conductivity (EC), silicon content (Si) in the soil and plant (leaf), liquid photosynthesis, stomatal conductance, intercellular concentration of CO₂, transpiration, efficiency water use and instantaneous carboxylation, besides fruit production, fruit mass, length and diameter and plant height. The second experiment 2 x 2 (two sources of concealer: limestone and calcium silicate) and two doses of KCl (control: equivalent to 150 kg ha⁻¹ and salt stress 700 kg ha⁻¹ K₂O) where the EC were evaluated, Si translocation in the plant, water use efficiency and instantaneous carboxylation and stress index. The results found in the different evaluations were submitted to variance analysis. To evaluate the means, the Scott-Knott (first experiment) and Tukey (second experiment) tests were applied. Standard deviations were calculated and correlation estimators (Pearson) were applied using SISVAR software. It was concluded that the 300 kg ha⁻¹ K₂O dose, in the presence of calcium silicate, provided the highest Si translocation, the best results for the electrical conductivity of 2,76 dS m⁻¹, Si content in the soil. of 5,70 mg kg⁻¹, 14% Si leaf content, improving photosynthetic rates and transpiration, increasing water use efficiency, instantaneous carboxylation efficiency and fruit yield, reducing stress index. Increasing salinity reduced fruit yield in the presence and absence of Si.

Key words: Abiotic stress, photosynthesis, productivity, calcium silicate.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

Figure 1. Water retention characteristic curve of the Oxisol used in the experiment43

Figure 2. Electrical conductivity of the soil as a function of the K_2O rates and sources of correctives (calcium silicate and calcareous).....44

Figure 3. Liquid photosynthesis (A), transpiration (B), stomatal conductance (C), intercellular CO_2 concentration (D), water use efficiency (E) and instantaneous efficiency of carboxylation (F) as a function of presence and absence of calcium silicate and rate of K_2O46

Figure 4. Production (A), fruit weight (B), fruit length (C), fruit diameter (D) and plant height (E) as a function of the presence and absence of calcium silicate and K_2O rates.....47

ARTIGO 2

Figura 1. Curva característica de retenção de água do Latossolo Vermelho utilizado no experimento (- Ψ_m = potencial matricial).57

Figura 2. Condutividade elétrica do solo em função das taxas de K_2O e fontes de corretivos..61

Figura 3. Translocação de Si (%) na planta em função das taxas de K_2O e fontes de corretivos.....62

Figura 4. Eficiência do uso da água (A) e eficiência instantânea da carboxilação (B) em função das taxas de K_2O e fontes de corretivos (silicato de cálcio e calcário dolomítico).....64

Figura 5. Índice de estresse (%) em função das taxas de K_2O e fontes de corretivos65

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Table 1. Treatments and equivalence in pots based on the two correctives (calcium silicate and calcareous) and rates of K_2O 41

Table 2. Soil silicon content in $CaCl_2$ 0.01 mol L^{-1} as a function of K_2O rates and corrective sources (calcareous and calcium silicate)44

Table 3. Silicon content in the leaf (%) as a function of K_2O rates and corrective sources (calcareous and calcium silicate).....45

ARTIGO 2

Tabela 1. Tratamentos e equivalência em vasos com base nos dois corretivos (silicato de cálcio e calcário) e doses de K_2O55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 A cultura do pimentão.....	16
2.2 Problemas de salinização do solo em cultivo protegido	18
2.3 Silício na horticultura.....	19
2.4 Silício como amenizador de estresse em plantas	20
2.5 Efeito da salinidade sobre o metabolismo vegetal.....	21
2.6 Condutividade elétrica	23
REFERÊNCIAS	24
CAPÍTULO 2	38
ARTIGO 1	38
Abstract.....	39
1. Introduction.....	40
2. Materials and methods	40
3. Results and discussion	43
4. Conclusion	48
References.....	48
CAPÍTULO 3	51
ARTIGO 2	52
Resumo	52
Abstract.....	53
Introdução	53
Material e métodos.....	55
Resultados e discussão	60
Conclusão.....	65
Referências.....	67

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O pimentão (*Capsicum annuum* L.) é cultivado e consumido em quase todo o Brasil, destacando-se entre os dez vegetais de maior importância econômica e social, sendo o estado de São Paulo o principal produtor, com uma produção de 790 toneladas em 2018, numa área de cultivo de 2.560 ha (IEA, 2018). Grande parte dos produtores de pimentão tem preferido manejar essa cultura em ambiente protegido, possibilitando desta forma uma oferta contínua com preços mais competitivos (Marques et al., 2011).

Uma das principais tecnologias de adubação utilizadas, especialmente em hortaliças frutíferas, cultivadas em ambientes protegidos é a fertirrigação. Entretanto, verifica-se que após três anos de cultivo ocorre um decréscimo na produtividade e na qualidade dos frutos relacionados à utilização excessiva de fertilizantes, o que, conseqüentemente, promove o acúmulo de sais no solo (Oliveira et al., 2013). Este acúmulo de sais no solo pode ser responsável por diferentes alterações bioquímicas, morfológicas e fisiológicas nas plantas (Filippou et al., 2014), e pela redução na produtividade (Praxedes et al., 2014).

Na cultura do pimentão, o potássio é um macronutriente essencial exigido em grande quantidade. A principal fonte de potássio utilizada pelos produtores é o cloreto de potássio, que apresenta um elevado teor salino (Nogueira et al., 2001). Contudo, segundo Vieira-Megda et al. (2014), o elevado acúmulo do íon cloreto causa sérios danos à biomassa microbiana, limitando os processos de decomposição e de ciclagem dos nutrientes.

Para amenizar os efeitos dos estresses abióticos e bióticos uma das alternativas é o uso de Si (Faria, 2000; De Moraes, 2018). O Si apresenta várias funções específicas, como corretivo da acidez do solo e neutralizante do alumínio trocável (Caires; Joris, 2016), aumenta espessura da folha, reduz a transpiração (Keller et al., 2015), aumenta o teor relativo de água nas plantas em condições de estresse salino (Etesami; Jeong, 2018), além de atuar na resistência ou tolerância contra patógenos (Camargo, 2016) e no aumento da produtividade (Liang et al., 2005; Luz et al., 2006; Nolla et al., 2012).

Desta forma, o objetivo com este estudo foi avaliar alternativas para amenizar os efeitos da salinidade em cultivo protegido de pimentão utilizando o silicato de cálcio na correção do solo, bem como avaliando fatores de produção e trocas gasosas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do pimentão

Estima-se que, no Brasil, a área cultivada com pimentão seja de, aproximadamente, 13 mil hectares, o que corresponde a uma produção anual de 280 mil toneladas (Embrapa, 2017). As maiores áreas de produção estão no Sudeste (Marouelli; Silva, 2012), sendo o Estado de São Paulo o principal produtor, com uma produção de 790 toneladas em 2018 (IEA, 2018).

O pimentão (*Capsicum annuum* L.) pertence à família das Solanáceas, é tipicamente de origem americana, ocorrendo em formas silvestres desde o sul dos Estados Unidos até o norte do Chile (Filgueira, 2008). É uma planta autógoma, arbustiva, com caule semilenhoso podendo ultrapassar um metro de altura, cujas raízes podem atingir até um metro de profundidade, com pouco desenvolvimento lateral. O caule suporta uma carga leve de frutos, e por isso exige tutoramento das plantas, devido à alta produtividade dos híbridos atuais. Por ser uma planta de clima tropical, desenvolve-se bem sob temperaturas elevadas ou amenas (Filgueira, 2008).

Por ser uma planta de origem tropical e subtropical o pimentão necessita que a temperatura seja moderadamente elevada durante o seu ciclo (Filgueira, 2008); a faixa ideal de temperatura do ar, para a planta adulta, é em torno de 16 a 30°C (Pereira, 1990). Entretanto, é importante ressaltar que o fator limitante para o desenvolvimento da cultivar é a baixa temperatura, principalmente nas fases de germinação, emergência e desenvolvimento das mudas (Filgueira, 2000). Temperaturas inferiores a 16 °C são limitantes e acabam afetando todas as fases da cultura. Já temperatura superior a 35°C compromete o desenvolvimento da planta e a produtividade, ocasionando a queda das flores (Filgueira, 2000).

O fotoperíodo não é um fator limitante, pois a floração e a frutificação ocorrem em qualquer período de luz, entretanto o florescimento, a frutificação e a maturação dos frutos são mais precoces em dias curtos, o que favorece a produtividade (Filgueira, 2008). Em relação ao solo, a baixa temperatura pode comprometer o desenvolvimento inicial do

pimentão (Filgueira, 2008), sendo que a faixa de pH da solução solo ideal para o seu desenvolvimento deve estar entre 5,5 a 6,8, uma vez que a cultura apresenta certa tolerância à acidez do solo, quando comparada a outras solanáceas (Souza et al., 2011).

O crescimento inicial é lento até aproximadamente 60 dias após o transplante das mudas, intensificando-se no período de florescimento e acentuando-se mais ainda durante a frutificação. Nestas fases, as plantas apresentam um aumento exponencial de massa da matéria seca (Villas Bôas, 2000). Do transplante das mudas, até aproximadamente 75 dias, a cultura do pimentão apresenta um crescimento significativamente lento, o que ocasiona uma baixa extração de nutrientes. Passado este período, e até 90 dias após o transplante, ocorre aumento no crescimento de maneira expressiva, coincidindo com o período de maior absorção de nutrientes. Isto se deve principalmente à frutificação, quando se observa maior extração de macronutrientes, principalmente potássio, seguido de nitrogênio e cálcio. Após os 90 dias, os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} apresentam altas taxas de absorção, principalmente no final do ciclo da cultura, entre 100 e 115 dias (Haag et al., 1970; Filgueira, 1982; Santiago & Goyal, 1985). O pimentão é uma cultura exigente em nutrientes minerais, principalmente o potássio (K), que é o mais requerido (Fontes et al., 2005). A ordem crescente de absorção de nutrientes para o cultivo de pimentão é fósforo (P), enxofre (S), magnésio (Mg), nitrogênio (N), cálcio (Ca) e potássio (K) (Filgueira, 2008).

Em geral, doses elevadas de K podem comprometer a produção e a qualidade dos frutos, fato este relacionado com a competição do K com o Ca e Mg pelos sítios de absorção, que causa desbalanceamento nutricional e redução na absorção de água pela planta (Marschner, 2012). Por outro lado, a deficiência de K pode provocar a redução significativa da produtividade (Freitas, 2009).

É comum o aparecimento de sintomas relacionados à podridão apical causados pela deficiência de Ca na solução solo e na planta (Souza et al., 2011). Assim, para o adequado desenvolvimento da planta e para que se atinja uma produtividade satisfatória, é primordial a reposição de água e de nutrientes em quantidades ideais e no momento oportuno (Campos et al., 2008). A quantidade de fertilizantes a serem aplicados no solo deve ser a mais próxima possível do que é absorvida pela planta, caso contrário corre-se o risco de salinização, devido ao acúmulo de sais na região do sistema radicular (Albuquerque et al., 2011).

2.2 Problemas de salinização do solo em cultivo protegido

O termo salinidade do solo está relacionado aos níveis de sais solúveis presentes na solução do solo que possam interferir negativamente no rendimento das plantas cultivadas (Munns & Tester, 2008; Silva, 2018). A salinidade pode ocasionar sérios riscos ao meio ambiente por causar a salinização do solo e inviabilizar a produção agrícola. Estima-se que cerca de mais de 800 milhões de hectares em todo o mundo, aproximadamente 6% da área terrestre do globo, estejam afetados por altos teores de sais solúveis (Zhang et al., 2010; Freire et al., 2014).

Em decorrência das condições climáticas e do uso da irrigação, a salinização é um fenômeno crescente em todo o mundo, principalmente em regiões áridas e semiáridas. A fertirrigação sem o manejo adequado, é um fator que contribui para o aumento das áreas com altas concentrações salinas (Lima Júnior; Silva, 2010; Pedrotti et al., 2015).

No Brasil, a salinização por causas naturais corresponde a cerca de 2,4% do total da área agrícola (FAO, 2008), principalmente na região Nordeste, onde aproximadamente, 30% das áreas cultivadas estão com problemas de salinização (Lima Júnior, 2010).

Os maiores problemas relacionados ao nível de sais solúveis presente na solução solo têm sido ocasionados pelo processo conhecido como salinização secundária, que se caracteriza pelo manejo inadequado da irrigação, associado à uma drenagem ineficiente e à presença de águas subsuperficiais ricas em sais solúveis (Coelho, 2013). A aplicação de fertilizantes de forma excessiva e pouco parcelada ao longo do ciclo da cultura induz as plantas a uma condição de estresse salino (Oliveira et al., 2010; Hoshiba Kawavata, 2017).

Quando se cultiva sob ambiente protegido, pode-se potencializar a salinização do solo, pois o uso intenso de adubação, a falta de chuvas para lixiviar o excesso de fertilizantes e a contínua evaporação da água do solo podem aumentar o teor de sais na solução do solo e prejudicar o rendimento das culturas. Desta forma, é necessário desenvolver alternativas sustentáveis para minimizar os efeitos relacionados à salinidade (Dias et al., 2010).

2.3 Silício na horticultura

Na crosta terrestre, o Si é o segundo elemento mais abundante, sendo encontrado sob formas combinadas, como os minerais silicatados e a sílica. Vários países, como a África do Sul, Austrália, Brasil, Estados Unidos e Japão, utilizam este elemento como fertilizante (Korndörfer; Oliveira, 2010). Seu uso tem sido estudado em diversas espécies vegetais por promover o desenvolvimento de plantas monocotiledôneas e dicotiledôneas (Epstein; Bloom, 2006; Ma; Yamaji, 2008; Rodrigues, 2008; Costa et al., 2010).

Considerado como elemento útil por apresentar várias funções específicas (FARIA, 2000; Costa et al., 2009; Freitas et al., 2011), o Si é um elemento benéfico para nutrição de plantas, pois aumenta a resistência das plantas ao ataque de insetos e patógenos, melhora o estado nutricional, reduz a transpiração e aumenta a eficiência fotossintética (Falqueto, 2008; Crusciol et al., 2013). Embora ainda seja desconhecida a função do Si no metabolismo vegetal, acredita-se que este elemento, quando solubilizado, tem sua participação na síntese de moléculas de defesa nas plantas (Ma; Yamaji, 2008).

O Si é um elemento que permite às plantas maior resistência aos estresses, sejam eles ocasionados por fatores bióticos ou abióticos (Goto et al., 2003; Hashemi et al., 2010). Sua absorção ocorre por meio de difusão passiva com a participação de transportadores localizados na endoderme e exoderme do sistema radicular (Ma; Yamaji, 2008), sendo que seu acúmulo é variável de acordo com a espécie (Epstein & Bloom, 2006).

As plantas são classificadas como acumuladoras, intermediárias e não acumuladoras de Si de acordo com a relação Si:Ca. As plantas acumuladoras são as que possuem relação Si:Ca maior que 1,0; as intermediárias, entre 0,5 e 1,0; e as não acumuladoras, quando essa relação Si:Ca é menor que 0,5 (Ma et al., 2001; Menegale et al., 2015). De forma geral, as plantas acumulam de 1 a 10% de Si na matéria seca (Ma; Yamaji, 2006; Queiroz et al., 2018), sendo observada a maior concentração na parede celular, que atua no suporte e na sustentação das plantas (Reis et al., 2007), sendo que Heine et al. (2005) observaram sua presença no citoplasma das células. Nas folhas, segundo Tonin (2005), os teores de Si no pimentão variam de 0,21 a 0,25 % e nos frutos a variação está entre 0,45 e 0,52 %, sendo a espécie classificada como não acumuladora de Si.

Uma forma de garantir o Si na planta é a aplicação como silicatos de Ca e/ou Mg. De acordo com a literatura a aplicação dessas formas de Si podem diminuir a acidez do solo (Carvalho-Pupatto et al., 2004; Ramos et al., 2006; Camargo et al., 2007; Moraes et al., 2018), devido à presença de SiO_3^{2-} (Alcarde, 1992; Pelvine et al., 2018), aumentar a

disponibilidade de Ca e de Mg (Carvalho-Pupatto et al., 2004; Ramos et al., 2006), a disponibilidade de P (Prado; Fernandes, 2001), o teor de Si no solo (Carvalho-Pupatto et al., 2004; Ramos et al., 2006; Camargo et al., 2007), o que reflete no aumento da produtividade das culturas (Moraes et al., 2018; Pereira et al., 2019).

2.4 Silício como amenizador de estresse em plantas

O acúmulo de Si nos órgãos de transpiração proporciona a formação de uma camada dupla de Si, que faz com que a exigência de água pelas plantas seja menor, uma vez que ocorre a redução da transpiração (Korndörfer et al., 2003; Moro et al., 2015). Portanto, os benefícios físicos de sua utilização estão relacionados à deposição de Si na parede celular, atuando na redução da perda de água e também como barreira física à penetração de fitopatógenos e ataques de insetos (Pozza; Pozza, 2003; Santos et al., 2005; Duarte; Coelho, 2011). O Si pode, ainda, promover a resistência das plantas em condições de estresse salino e de falta de água, garantindo a integridade e estabilidade da membrana celular (Zucarini, 2008).

Em condições de seca, a utilização de Si reduz os efeitos do estresse, pois as plantas apresentam aumento em sua capacidade de defesa antioxidante (Zhu et al., 2004). Em alguns estudos, observam-se alterações na taxa de transpiração, na condutância estomática e acúmulo de matéria seca em plantas quando supridas com Si em relação a plantas não supridas (Hattori et al., 2005).

Estudos usando adubação silicatada demonstraram a redução da podridão apical em frutos de tomate, possivelmente devido ao maior fornecimento de cálcio aos frutos (Carvalho, 2000; Carvallho et al., 2002; Cantuário et al., 2014).

Os depósitos de Si nos tecidos foliares podem reduzir a taxa de transpiração, o que diminui a abertura dos estômatos, limitando, assim, a perda de água (Agarie et al., 1998; Oliveira; Castro, 2002; Guerra et al., 2014). O acúmulo de Si torna as folhas mais rígidas e eretas, o que proporciona a maior interceptação da luz contribuindo com a eficiência fotossintética (Nwugo; Huerta, 2008; Crusciol et al., 2013). A escolha da fonte, a dosagem e a forma de aplicação do Si, são importantes para proporcionar a potencialização dos seus efeitos sobre a planta.

Diversos são os estudos que demonstram a eficiência na aplicação de Si via solo e em solução hidropônica para as plantas dicotiledôneas no que se refere a anomalias fisiológicas, seca e no aumento de produtividade (Liang et al., 2005; Luz et al., 2006; Nolla et al., 2012;

Cantuátio et al., 2014). O uso do Si via solo tende a aumentar a atividade enzimática protegendo a planta contra patógenos e contra fatores causadores de estresses bióticos e abióticos (Rodrigues et al., 2010).

2.5 Efeito da salinidade sobre o metabolismo vegetal

O efeito da salinidade sobre as plantas ocorre devido a dois fatores distintos do estresse salino: o componente iônico (elevados teores de Na e Cl e da relação K/Na e outros nutrientes) e o componente osmótico (elevação da concentração de solutos na solução solo). A redução do potencial osmótico sobre o desenvolvimento da planta está diretamente ligada ao efeito osmótico da salinidade, ocasionado pelo excesso de sais solúveis presentes na solução solo, que restringe a absorção de água e nutrientes, sendo este processo denominado seca fisiológica (Dias; Blanco, 2010; Alves et al., 2011).

Quanto ao efeito iônico, resultado do acúmulo de Sódio (Na) e Cloro (Cl) em tecidos vegetais, observa-se, principalmente, a mudança nas relações Na/Ca, Na/K e Cl/NO₃, o que acaba ocasionando desde reduções da área foliar até a morte da planta (Cavalcante et al., 2010). Desta forma, a toxicidade iônica pode ser constatada por alterações nas razões K/Na, Ca/Na dos tecidos, interferindo na homeostase iônica nas células (Apse; Blumwald, 2007). O acúmulo de íons Na e Cl nas folhas podem provocar a necrose nos tecidos foliares a aceleração da senescência de folhas maduras o que acaba reduzindo a área destas folhas destinada à fotossíntese (Munns, 2002).

A salinidade do solo além de afetar a disponibilidade de água para a planta, ocasiona vários distúrbios nutricionais, dependendo dos sais e do genótipo vegetal. Assim, deve-se considerar que a presença em excesso de íons impede a absorção de elementos essenciais ao crescimento da planta, promovendo um desbalanceamento nutricional (Tester; Davenport, 2003).

Pesquisas destacam que, em situações de cultivo em meio salino, a elevada concentração de Na promove interações consideradas antagônicas com o K, Mg e Ca (Kahlaoui et al., 2011; Raja et al., 2012; Hajiaghæi-Kamrani; Hosseinniya, 2013) e concentrações elevadas de Cl⁻ podem promover interações antagônicas com o NO₃⁻, PO₄³⁻ e SO₄⁻.

A alta relação Na/K inativa enzimas e, conseqüentemente, inibe a síntese proteica. Este fato está relacionado à participação do K na ativação de reações enzimáticas consideradas vitais, contribuindo assim com a manutenção do potencial osmótico do vacúolo,

com o turgor celular, e com a síntese de proteínas. (Tester; Davenport, 2003). Segundo Marschner (2012), a deficiência de K em plantas cultivadas em meio salino pode ser aumentada pelo excesso de Na, uma vez que esses íons competem pelos mesmos sítios no sistema de absorção na membrana plasmática das células radiculares.

Estudando a cultura do pimentão, em quatro níveis salinos nas soluções nutritivas (1,5 a 6,0 dS m⁻¹ de CE), Leonardo et al. (2008) obtiveram resultados que demonstraram indícios antagônicos entre nutrientes nas formas catiônicas como o K, Mg e Ca em razão do aumento da concentração de KCl, em que a concentração de Mg e Ca nas folhas de pimentão diminuíram devido ao aumento da condutividade elétrica, o que provavelmente foi induzido pelo antagonismo com o potássio.

Na solução nutritiva, o aumento da salinidade, ocasionada pelo manejo inadequado da irrigação ou uso de águas com alta salinidade, provocam a redução da produtividade e o crescimento da maioria das culturas (Munns, 2002; Praxedes et al., 2014), devido à redução nos teores foliares de K e P, e aumento nos teores de Na e Cl (Soares, 2014), além da redução no acúmulo de macronutrientes como o Ca, N, K, Mg e P (Carmo et al., 2011).

O aumento da salinidade na água de irrigação do cultivo de pimentão, reduziu a emergência e o crescimento das plantas (Nascimento et al., 2011; 2015). Os autores relataram que fatores como a altura da planta, o diâmetro do caule e a área foliar são diretamente influenciados pela salinidade. Os valores da altura, por exemplo, variam de 45 cm, para plantas que sofreram irrigação com água com menor salinidade (0,56 dS m⁻¹), até 34 cm nas plantas que receberam água com maior nível de salinidade (5,0 dS m⁻¹), uma redução de 25% na altura das plantas e 35% no diâmetro do caule. (Nascimento et al., 2011; 2015).

É importante ressaltar que, em condições de estresse salino, pode ocorrer o fechamento dos estômatos devido à limitação da condutância estomática e a transpiração, o que conseqüentemente acaba interferindo diretamente na fotossíntese (Silva et al., 2010), pois a entrada de CO₂ nas plantas ocorre através dos estômatos, sendo o movimento estomático o principal mecanismo de controle das trocas gasosas nas plantas superiores.

A redução da condutância estomática, bem como alterações morfológicas das células foliares são observadas em situação de estresse salino, uma vez que a salinidade induz o fechamento dos estômatos, limitando perda de água pelas folhas (Yousif et al., 2010), com conseqüente fechamento dos estômatos, resultando em reduzida difusão do CO₂ para os cloroplastos, o que pode inibir o processo de fotossíntese (Centritto et al., 2003).

2.6 Condutividade elétrica

Para o desenvolvimento das culturas é essencial que haja disponibilidade de água, cujo fornecimento deve ser adequado em função da espécie vegetal. Entretanto, é necessário ressaltar que a utilização de um sistema de irrigação não garante o aumento da produtividade, já que na maioria das vezes o manejo incorreto da irrigação acaba proporcionando baixas produtividades e o aumento dos custos de produção (Panazzolo, 2011). Pode-se destacar que o manejo inadequado do sistema de irrigação acaba favorecendo o acúmulo de sais no solo, o que afeta a produção da cultura.

A qualidade da água, as condições de drenagem, as propriedades físicas do solo e o balanço de sais no subsolo são fatores que influenciam no acúmulo de sais no solo de forma significativa (Dias et al., 2005). Altas concentrações de íons e o baixo potencial osmótico caracterizam o processo de salinização no solo, contudo as plantas têm a capacidade de promover ajustes osmóticos, o que pode contribuir com a tolerância salina.

A condutividade elétrica (CE) está relacionada à perda de água no solo. Ela é uma medida indireta, que indica a quantidade de íons presentes numa solução, e essa quantidade de íons são interpretados como íons nutrientes como K, Na, Cl, etc, ou seja, a salinidade do solo. A CE aparente no solo se deve a uma série de fatores combinados, como as propriedades físico-químicas do solo, os sais presentes, o seu teor de argila, a temperatura e matéria orgânica do solo. A determinação CE foi utilizada na agricultura a primeira vez para se determinar a salinidade do solo na década de 1970, na Califórnia (EUA). Contudo, a CE pode ser utilizada para mapear a variação espacial de várias propriedades do solo, como o teor de argila, teor de água no solo, entre outros (Corwin; Lesch, 2005).

Estudos realizados por Costa et al. (2001) destacam que o valor da CE pode sofrer variações dependendo da cultivar utilizada em cada cultura e de fatores relacionados a condições climáticas, em que os valores são proporcionais à concentração de vários íons presentes na solução. A CE da solução nutritiva influencia na absorção de água e nutrientes, estando estes intimamente ligados. Desta forma, a absorção de água e de nutrientes são alterados, afetando a fisiologia das plantas (Beltrão et al., 1997), destacando-se a abertura dos estômatos, a redução ou aumento da área foliar, além de redução na eficiência fotossintética e produção de matéria seca pelas plantas (Costa et al., 2001).

A concentração de K e a CE na solução solo podem ser monitoradas ao longo do ciclo da cultura (Silva et al., 2012). A elevação na CE induziu uma redução do total de frutos. Leonardo (2003) observou uma redução em torno de 55% do fruto de pimentão tratado em

solo com CE de 6 dSm^{-1} em relação ao tratamento controle (CE $1,5 \text{ dSm}^{-1}$). O autor, ainda, observou que a elevação nos valores de CE reduziu o número de frutos por planta e a massa média de frutos (Leonardo, 2003).

REFERÊNCIAS

ALVES, M. S.; SOARES, T. M.; SILVA, L. T.; FERNANDES, J. P.; OLIVEIRA, M. L. A.; PAZ, V. P. S. Estratégias de uso de água salobra na produção de alface em hidroponia NFT. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.5, p.491-498, maio 2011.

APSE, M. P.; BLUMWALD, E. Na^+ transport in plants. **FEBS Letters**, USA, v.581, n.1, p.2247-2254, Apr. 2007.

AGARIE, S.N.; HANAOKA, O.; UENO, A.; MIYAZAKI, F.; KUBOTA, W.; AGATA, P.B.; KAUFMAN. Effects of silicon tolerance to water déficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 1, n.1, p.96-103, Dec.1998.

ALBUQUERQUE, F.S.; SILVA, E.F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, J.A.C.; NUNES, M.F.F.N. Crescimento e rendimento de pimentão fertirrigado sob diferentes lâminas de irrigação e doses de potássio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.7, p.686-694, jul. 2011.

ALCARDE, J.C. **Corretivos da acidez dos solos**: características e interpretações técnicas. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 1992. (Boletim Técnico, 6).

BELTRÃO, J.; TRINDADE, D.; CORREIA, P.J. Lettuce yield response to salinity of sprinkle irrigation water. **Acta Horticulturae**, Belgium, v.449, n.1, p.623-627, Dec. 1997.

CAIRES, E.F.; JORIS, H.A.W. Uso de corretivos granulados na agricultura. IPNI - **International Plant Nutrition Institute**, Piracicaba, v.154, n.17, p. 17–21, janeiro. 2016. Disponível em: <<http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/issue/IA-BRASIL-2016-156?OpenDocument&toc=0>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

CAVALCANTE, L.F.; CORDEIRO, J.C.; NASCIMENTO, J.A.M.; CAVALCANTE, I.H.L.; DIAS, T.J. Fontes e níveis da salinidade da água na formação de mudas de mamoeiro cv. Sunrise solo. **Semina: ciências Agrárias**, Londrina, v.31, n.1, p.1281-1290, out. 2010.

CAMARGO, M.S.; PEREIRA, H.S.; KORNDÖRFER, G.H.; QUEIROZ, A.A.; REIS, C.B. Soil reaction and absorption of silicon by rice. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 64, n.2, p.176-180, mar/abr. 2007.

CAMARGO, M.S. Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v.1, n. 155, p. 1-8, set. 2016.

CAMPOS, V.B.; OLIVEIRA, A.P.; CALVALCANTE, L.F.; PRAZERES, S.S. Rendimento do pimentão submetido ao nitrogênio aplicado via água de irrigação em ambiente protegido. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v.8, n.2, p.72-79, jan. 2008.

CANTUÁRIO, F.S.; LUZ, J.M.Q.; PEREIRA, A.I.A.; SALOMÃO, L.C.; REBOUÇAS, T.N.H. Podridão apical e escaldadura em frutos de pimentão submetidos a estresse hídrico e doses de silício. **Horticultura Brasileira**, Vitória da Conquista, v.32, n.2, p.215-219, jun. 2014.

CARMO, G. A.; OLIVEIRA, F. R. A.; MEDEIROS, J. F.; CAMPOS, M. S.; FREITAS, D. C. Teores foliares, acúmulo e partição de macronutrientes na cultura da abóbora irrigada com água salina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.15, n.5, p.512-518, jan. 2011.

CARVALHO, J.C. **Análise de crescimento e produção de grãos da cultura do arroz irrigado por aspersão em função de escória de siderurgia como fonte de silício**. 2000. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UNESP, Botucatu, 2000.

CARVALHO, J. de G.; MACHADO, A. Q.; NASCIMENTO, I.R. do; BOAS, R.C.V. Desempenho da cultura do tomate adubado com silifétil. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, p.2, jul. 2002. Suplemento 2.

CARVALHO-PUPATTO, J.G.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.39, n.12, p.1213-1218, dez. 2004.

CENTRITTO, M.; LORETO, F.; CHARTZOULAKIS, K. The use of low [CO₂] to estimate diffusional and non-diffusional limitations of photosynthetic capacity of salt - stressed olive saplings. **Plant Cell Environ.**, Glasgow, v.26, n.1, p. 585-94, Apr. 2003.

COELHO, D. S. **Influência da salinidade nos aspectos nutricionais e morfofisiológico de genótipos de sorgo forrageiro**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Juazeiro: Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2013.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity part II. Case study. **Computer and Electronics in Agriculture**, Riverside, v. 46, n. 01/03, p. 135-152, mar. 2005.

COSTA, P. C.; DIDONE, E.B.; SESSO, T.M.; CAÑIZARES, K.A.L.; GOTO, R. Condutividade elétrica da solução nutritiva e produção de alface em hidroponia. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.3, p. 595-597, set. 2001.

COSTA, R.R.; MORAES, J.C.; COSTA, R.R. Interação silício-imidacloprid no comportamento biológico e alimentar de *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae) em plantas de trigo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n.2, p.455-460, mar/abr. 2009.

COSTA, L.M.; SANTOS, R.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MOREAU, A.M.S.S.; MOREAU, M.S. Ocorrência de corpos silicosos em horizontes superficiais de solos de diferentes ecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n.34, p. 871-879, maio/jun. 2010.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P.; CASTRO, G.S.A.; COSTA, C.H.M.; NETO, J.F. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na sola, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.44, n.2, p.404-410, abr./jun. 2013.

DE MORAES, E.; REIS, A.C.; SILVA, N.E.P.; FERREIRA, M. Nutrientes no solo e produção de quiabo conforme doses de silicato de cálcio e magnésio. **Journal of Neotropical Agriculture**, Cassilândia, v. 5, n.1, p. 60-65, jan./mar. 2018.

DIAS, N.S.; DUARTE, S.N.; GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; SOARES, T.M. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.496-504, 2005. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662005000400009>> Acesso em: 21 jun 2019.

DIAS, N. D.; BLANCO, F. F. Efeitos dos sais no solo e na planta. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, 2010. p.129-140.

DUARTE, I.N.; COELHO, L. Uso do silício no cultivo de mudas de eucalipto. **Enciclopédia Biosfera**, Goiania, v.7, n.12, p.1-10, maio 2011.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Novas pimentas e pimentões para a agricultura brasileira**. (Projeto). Embrapa Hortaliças, 2017. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/204034/novas-pimentas-e-pimentos-para-a-agricultura-brasileira>> Acesso em: 21 jun 2019.

EPSTEIN, E.; BLOOM, J.A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta, 2006. 403 p.

ETESAMI, H.; JEONG, B.R. Silicon (Si): Review and future prospects on action mechanisms in alleviating biotic and a biotic stress in plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Bethesda, v.147, n.1, p.881-896, jan. 2018.

Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>> Acesso em: 23 Abr. 2019.

FAO: Extent and Causes of Salt-affected Soils in Participating Countries. **FAO - Land and Plant nutrition management service**. Disponível em:

<<http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush/topic2.htm#top>>. Acesso em: 10 mar. 2008.

FALQUETO, A. R. **Crescimento, fotossíntese e partição de assimilados em genótipos de arroz irrigado**. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia/ Fisiologia Vegetal) -Universidade Federal de Pelotas, 2008.

FARIA, R. **Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz do sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. Dissertação (Mestrado), Departamento de Solos, Universidade Federal de Lavras, Viçosa, 2000.

FILGUEIRA, F.A.R. **Manual de Olericultura: cultivo e comercialização de hortaliças**. 2. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1982. v.2, 357p.

FILGUEIRA, F.A.R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa. UFV, 2000. 402p.

FILGUEIRA, F.A.R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3. ed. Viçosa : UFV, 2008. 421p.

FILIPPOU, P.; BOUCHAGIER, P.; SKOTTI, E.; FOTOPOULOS, V. Proline and reactive oxygen/nitrogen species metabolism is involved in the tolerant response of the invasive 29 plant species *Ailanthus altissima* to drought and salinity. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v.97, n.1, p.1-10, Sept. 2014.

FONTES, P.C.R.; DIAS, E.N.; GRAÇA, R.N. Acúmulo de nutrientes e método para estimar doses de nitrogênio e de potássio na fertirrigação do pimentão. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.23, n.2, p.275-280, abr./jun. 2005.

FREIRE, M.B.G.S.; MIRANDA, M.F.A.; OLIVEIRA, E.E.M.; SILVA, L.E.; PESSOA, L.G.M.; ALMEIDA, B.G. Agrupamento de solos quanto à salinidade no Perímetro Irrigado de Custódia em função do tempo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, supl., p.86-91, 2014. Suplemento. doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18nsupps86-s91

FREITAS, K.K.C. de. **Produção, qualidade e acúmulo de macro nutrientes em pimentão cultivado sob arranjos espaciais e espaçamentos na fileira**. 2009.. Tese (Doutorado em Ciências em Fitotecnia)- Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Mossoró, RN, 2009.

FREITAS, L.B.; COELHO, E.M.; MAIA, S.C.M.; SILVA, T.R.B. Adubação foliar com silício na cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v.58, n.2, p. 262-267, abr. 2011. doi.org/10.1590/S0034-737X2011000200020

GOTO, M.; EHARA, H.; KARITA, S.; TAKABE, K.; OGAWA, N.; YAMADA, Y.; OGAWA, S.; YAHAYA, M.S.; MORITA, O. Protective effect of silicon on phenolic biosynthesis and ultraviolet spectral stress in rice crop. **Plant Science**, New York, v.164, n.3, p.349-356, mar. 2003.

GUERRA, A.M.N.M.; RODRIGUES, F.A.; LIMA, T.C.; BERGER, P.G., BARROS, A.F.; SILVA, Y.C.R. Capacidade fotossintética de plantas de algodoeiro infectadas por ramulose e supridas com silício. **Bragantia**, Campinas, v.73, n.1, p. 50-64, mar. 2014. doi.org/10.1590/brag.2014.010

HAAG, H.P.; HOMA, P.; KIMOTO, T. Absorção de nutrientes pela cultura do pimentão. **Solo**, São Paulo-SP, v.2, n.62, 1-14, abr. 1970.

HASHEMI, A.; ABDOLZADEH, A.; SADEGHIPOUR, H.R. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. **Soil Science and Plant Nutrition**. Tokyo, v. 56, n.1, p.244-253, Apr. 2010.

HAJIAGHAEI-KAMRANI, M.; HOSSEINNIYA, H. Effect of salinity on nutrient uptake in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in hydroponic system. **International Journal of Agronomy and Plant Production**, London, v.4, n.10, p.2729-2733, Sept. 2013.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; AN, P.; MORITA, S.; LUXOVA, M.; LUZ, A. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 123, n.4, p.459-466, Mar. 2005.

HEINE, G.; TIKUM, G.; HORST, W.J. Silicon nutrition of tomato and bitter gourd with special emphasis on silicon distribution in root fractions. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 168, n.4, p. 600-606, July. 2005.

HOSHIBA KAWAVATA, C.K.; FATECHA FOIS, D. A.; COPPO, J.C.; ALVES NETO, A. Influência de doses e de duas fontes de potássio no sistema radicular do milho e na condutividade elétrica no solo. **Investig. Agrar.**, San Lorenzo, v.19, n.1, p. 28-34, jun. 2017. Disponível em: <http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2305-06832017000100028&lng=es&nrm=iso>. Acesso em: 23 jun. 2019. doi.org/10.18004/investig.agrar.2017.jun.28-34.

IEA: Instituto de Economia Agrícola. Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo – SP.2018. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1> Acesso em: 20 jun 2019.

KAHLAOU, B.; HACHICHA, M.; REJEB, M. N.; HANCHI, B.; MISLE, E. Effects of saline water on tomato under subsurface drip irrigation: nutritional and foliar aspects. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v.11, n.1, p.69-86, Mar. 2011.

KELLER, C; RIZWAN, M; DAVIDIAN, J.C.; POKROVSKY, O.S.; BOVET, N; CHAURAND, P; MEUNIER, J.D. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 μ M Cu. **Planta**, Berlin, v.241, n.4, p. 847–860, Apr. 2015

KORNDÖRFER, G.H; NOLLA, A.; OLIVEIRA, L.A. **A aplicação de silício no solo**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

KORNDÖRFER, G.H.; OLIVEIRA, L.A. Silício na agricultura. SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, 5., 2010, Viçosa. 2010. **Anais** [...] Viçosa, 2010. 3p.

LEONARDO, M. **Estresse salino induzido em plantas de pimentão (*Capsicum annuum* L.) fertirrigadas e seus efeitos sobre a produtividade e parâmetros bioquímicos**. 2003. Dissertação (Mestrado) Botucatu: UNESP, Botucatu, 2003.

LEONARDO, M.; BROETTO, F.; VILLAS-BÔAS, R. L.; MARCHESE, J. A.; TONIN, F. B.; REGINA, M. Estado nutricional e componentes da produção de plantas de pimentão conduzidas em sistema de fertirrigação durante indução de estresse salino em cultivo protegido. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.4, p.883-889, dez. 2008.

LIMA JUNIOR, J. A.; SILVA, A. L. P. Estudo do processo de salinização para indicar medidas de prevenção de solos salinos. **Enciclopédia biosfera: centro Científico Conhecer**, Goiânia, v.6, n.11, p.1-21, dez. 2010.

LIANG, Y.C.; SUN, W.C.; SI, J. Effects of foliar-and root-applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *Cucumis sativus*. **Plant Pathology**, Oxford, v. 54, n.5, p.678-685, oct. 2005.

LUZ, J. M. Q.; GUIMARÃES, S.T.M.R.; KORNDÖRFER, G.H. Produção hidropônica de alface em solução nutritiva com e sem silício. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 24, n.3, p. 295-300, jun./set. 2006.

MA, J.F.; MIYAKE, Y.; TAKASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plant. In: DATNOFF, E. E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Eds). **Silicon in Agriculture**. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier Science, 2001. p.17-39.

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

MA, J.F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. *Cel. Molec.* **Life Science**, Beijing, v. 65, n.19, p. 3049-3057, June. 2008.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C. Irrigação na cultura do pimentão. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária., 2012. (Circular Técnica 101:20)

MARQUES, D. J.; BROETTO, F.; SILVA, E. C.; FREITAS, J. M. N.; LOBATO, A. K. S.; ALVES, G. A. R. Changes in leaf proline and fruit production induced by potassium stress in eggplant. **International Journal of Food, Agriculture and Environment** (Print), v. 9, p. 191-194, 2011.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. Austrália: Elsevier, 2012. 651p.

MENEGALE, M.; CASTRO, G.; MANCUSO, M. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 4, n.especial, p. 435-454, Jan. 2015.

MORAES, R.E.; REIS, A.C.; SILVA, N.E.P.; FERREIRA, M.; MENEZES, F.G. Nutrientes no solo e produção de quiabo conforme doses de silicato de cálcio e magnésio. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v.5, n.1, p.60-65, jan./mar. 2018.

MORO, A.L.; BROETTO, F.; MORO, E. Relação hídrica e teor de clorofila em dois cultivares de arroz submetido à deficiência hídrica e adubação silicatada. **Irriga**, Botucatu, v.20, n.3, p.570-586, out. 2015.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant and Cell Environment**, Australia, v.25, n.2, p.239-250, Mar. 2002.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, Australia, v.59, n.1, p.651-681, June 2008.

NASCIMENTO, J. A. M.; CAVALCANTE, L. F.; SANTOS, P. D.; SILVA, S. A.; VIEIRA, M. S.; OLIVEIRA, A. P. Efeito da utilização de biofertilizante bovino na produção de mudas de pimentão irrigadas com água salina. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.6, n.2, p.258-264, abr./jun. 2011.

NASCIMENTO, I. B.; MEDEIROS, J. F.; ALVES, S. S. V.; LIMA, B. L. C.; SILVA, J. L. A. Desenvolvimento inicial da cultura do pimentão influenciado pela salinidade da água de irrigação em dois tipos de solos. **ACSA – Agropecuária Científica no Semi-Árido**, Campina Grande, v.11, n.1, p37-43, jan /abr. 2015.

NOGUEIRA, F. D.; SILVA, E. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Adubação potássica do cafeeiro**. Washington, DC: SOPIB, 2001. 81 p.

NOLLA, A.; FARIA, R.J. de; KORNDÖRFER, G.H.; SILVA, T.R.B. Effect of silicon on drought tolerance of unland Rice. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, Helsinki, v.10, n.1, p.269-272, Jan. 2012.

NWUGO, C. C.; HUERTA, A. J. Effects of silicon nutrition on cadmium uptake growth and photosynthesis of rice plants exposed to low-level cadmium. **Plant and Soil**, The Hague, v. 311, n.1, p. 73-86, Oct. 2008.

OLIVEIRA, L.A.; CASTRO, N.M. Ocorrência de sílica nas folhas de *Curatella americana* L. e de *Davillaelliptica* St. Hill. **Revista Horizonte Científico**, Uberlândia, v. 4, n.1, p.116, fev. 2002.

OLIVEIRA, A. B.; GOMES FILHO, E.; ENÉAS FILHO, J. O problema da salinidade na agricultura e as adaptações das plantas ao estresse salino. **Enciclopédia Biosfera: centro científico conhecer**. Goiânia, v.6, n.11, p.1-16, nov. 2010.

OLIVEIRA, FA; DUARTE, SN; MEDEIROS, JF; DIAS, NS; SILVA, RCP; LIMA, CJGS. Manejos da fertirrigação e doses de N e K no cultivo de pimentão em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n.11, p.1152-1159, nov. 2013.

PANAZZOLO, F. **Influência de diferentes doses de salinidade e níveis de água na produção de cenoura**. 2011. Dissertação (Mestrado)- UNESP, Botucatu, 2011.

PEDROTTI, A.; CHAGAS, R.M.; RAMOS, V.C.; PRATA, A.P.N.; LUCAS, A.A.T.; SANTOS, P.B. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v.19, n.2, p. 1308-1324, maio/ago. 2015. doi: 105902/2236117016544

PELVINE, R. A.; SILVA, R. M.; RIBEIRO, N. P.; GARRETO, F. G. S.; MARQUES, D. J. Silicato de cálcio como amenizador de estresse salino em plantas de pimentão. In: SIMPÓSIO DE ECOFISIOLOGIA APLICADA À AGRICULTURA, 2., 2018, Botucatu. **Anais [...]** Botucatu: ECOA, 2018. Disponível em: < <http://www.fepaf.org.br/ecoa/2018/NU%2017%20-%20Ra%C3%ADra%20Andrade%20Pelvine.pdf>> Acesso em: 20 jun 2019.

PEREIRA, A.L. **Cultura do pimentão**. Fortaleza: Departamento Nacional de Obras Contra as Secas, 1990. 49p.

PEREIRA, A.I.A.; GUIMARÃES, J.J.; COSTA, J.V.; CANTUÁRIO, F.S.; SALOMÃO, L.C.; OLIVEIRA, R.C.; LUZ, J.M.Q. Growth of sweet pepper plants submitted to water tensions in soil and potassium silicate doses. **Horticultura Brasileira**, Vitória da Conquista, v. 37, n.1, p.82-88, jan./mar. 2019. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/s0102-053620190113>> Acesso em: 20 Jun 2019.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.36, n.9, p.1199-1204, set. 2001.

POZZA, E. A; POZZA, A.A.A. Manejo de doenças de plantas com macro e micronutrientes. **Revista Brasileira de Fitopatologia**, Brasília, v. 28, n.1, p.52-54, jan./abr. 2003.

PRAXEDES, S. C.; DAMATTA, F. M.; LACERDA, C. F.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Salt stress tolerance in cowpea is poorly related to the ability to cope with oxidative stress. **Acta Botanica Croatica**, Croatia, v.73, n.1, p.78-89, Apr.2014.

QUEIROZ, D.L.; CAMARGO, J.M.M.; DEDECEK, R.A.; OLIVEIRA, E.B.; ZANOL, K.M.R.; MELIDO, R.C.N. Absorção e translocação de silício em mudas de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.28, n.2, p.632-640, abr./jun. 2018.
doi.org/10.5902/1980509832053

RAJA, S.; SHOKAT, S.; AZHAR, F. M.; AZHAR, M. T.; KHAN, A. A. Screening of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) genotypes at different salinity levels. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, London, v.4, n.6, p.94-100, Mar. 2012.

RAMOS, L.A.; NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.1, p.849-857, out. 2006.

REIS, T.H.P.; GUIMARÃES, P.T.G.; FIGUEIREDO, F.C; POZZA, A.A.A.; NOGUEIRA, F.D.; RODRIGUES, C.R. **O silício na nutrição e defesa de plantas**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2007. 119p. (Boletim Técnico, nº 82.)

RODRIGUES, F.A. Relação entre doenças e a nutrição das plantas: O caso elemento silício In: Prado, R.M.; ROZANE, D.E.; VALE, D.W; CORREIRA, M.A.R. e SOUZA, H.A. **Nutrição de plantas: diagnose foliar em grandes culturas**. Jaboticabal: FCAV, Capes / Fundunesp. 2008. 301p.

RODRIGUES, F. Á.; DUARTE, H.S.S.; REZENDE, D.C.; WORDELL FILHO, J.A.; KORNDÖRFER, G. H.; ZAMBOLIM, L. Foliar spray of potassium silicate on the control of angular leaf spot on beans. **Journal of Plants Nutrition**, New York, v.33, n.14, p. 2082-2093, Nov. 2010.

SANTOS, D.M.; POZZA, E.A.; POZZA, A.A.A.; CARVALHO, J.G.; BOTELHO, C.E.; SOUZA, P.E. Intensidade de cercosporiose em mudas de cafeeiro em função de doses de silício. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 30, n.6, p.582-588, nov./dez. 2005.

SANTIAGO, C. L.; GOYAL, M. R. Nutrient uptake and solute movement in drip irrigated summer peppers. **Journal of Agricultural**, Porto Rico, v.69, n.1, p-63-8, Jan. 1985

SILVA, C. D. S.; SANTOS, P. A. A.; LIRA, J. M. S.; SANTANA, M. C.; SILVA JUNIOR, C. D. Curso diário das trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à deficiência hídrica. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.23, n.4, p.7-13, Oct. 2010.

SILVA, E. G. **Acúmulo de nutrientes e desempenho agrônômico do pimenteiro (*Capsicum Annuum* L.) em função dos métodos de enxertia**. 2012. Dissertação (Mestrado)- UNESP, Botucatu, 2012.

SILVA, T.L. Qualidade da água residuária para reuso na agricultura irrigada. **Irriga**, Botucatu, v.1, n.1, p.101-111, ago. 2018.

SOARES, H. R. **Cultivo hidropônico de alface americana utilizando águas salobras**. 2014. Dissertação (Mestrado) - UFRPE, Recife, 2014.

SOUZA, V.F. de; MARQUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. **Irrigação e fertirrigação em fruteira e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 736-736.

TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na^+ Tolerance and Na^+ Transport in Higher Plants. **Annals of Botany**, London, v.91, n.5, p.503-527, Apr.2003.

TONIN, F. B. **Atividade de enzimas antioxidantes e absorção de silício em plantas submetidas a estresse salino**. 2005. Dissertação (Mestrado Agronomia) - UNESP-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2005.

VIEIRA-MEGDA, M.X.; MARIANO, E.; LEITE, J.M.; MEGDA, M.M.; TRIVELIN, P.C.O. Chloride ion as nitrification inhibitor and its biocidal potential in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, London, v.72, n.1, p.84-87, May. 2014. Available from: <<https://www.researchgate.net/publication/260215568>>. Acesso em 19 maio 2018. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.01.030.

VILLAS BÔAS, R.L.; KANO, C.; LIMA, C.P.; MANETTI, F.A.; FERNANDES, D.M. Efeitos de doses de nitrogênio aplicado de forma convencional através da fertirrigação da cultura do pimentão. *Horticultura Brasileira*, Campinas, v.18, n.1, p.801-802, 2000. Suplemento.

YOUSIF, B. S.; NGUYEN, T. N.; FUKUDA, Y.; HAKATA H.; OKAMOTO, Y.; MASAOKA, Y.; SANEOKA, H. Effect of Salinity on Growth, Mineral Composition, Photosynthesis and Water Relations of Two Vegetable Crops; New Zealand Spinach (*Tetragonia tetragonioides* L) and Water Spinach (*Ipomoea aquatica*). **International Journal of Agriculture & Biology**, Pakistan, v.12, n.2, 1-7, Jan. 2010.

ZHANG, H.; IRVING, L. J.; MCGILL, C.; MATTHEW, C.; ZHOU, D.; KEMP, P. The effects of salinity and osmotic stress on barley germination rate: sodium as an osmotic regulator. **Annals of Botany**, London, v.106, n.6, p.1027-1035, Dec. 2010.

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

ZUCARINI, P. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl estress. **Biologia Plantarum**, Praha, v. 52, n.1, p.157-160, Mar. 2008.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 1

(Artigo formatado de acordo com as normas do American Journal of Experimental Agriculture, Past ISSN: 2231-0606 – B1- submetido em 25/07/19, aceito em 05/08/19, PUBLICADO em 17/08/2019.



Journal of Experimental Agriculture International

Fertilization With Silicon in Sweet Pepper Improved Plants Grown Under Salt Stress

Márcio de Souza Dias^{1*}, Douglas José Marques¹ and Hudson Carvalho Bianchini¹

¹ Department of Agronomy, University José do Rosário Vellano (UNIFENAS), Alfenas, Minas Gerais, Brazil.

Authors' contributions

This work was carried out in collaboration among all authors. Authors MSD, DJM and HCB conducted the experiment and wrote the first draft of the manuscript. discussed the results, correct and improve the writing of the manuscript in English versions. All authors read and approved the final manuscript.

Article Information

DOI: 10.9734/JEAI/2019/v40i230359

Editor(s):

(1) Dr. Slawomir Borek, Professor, Department of Plant Physiology, Adam Mickiewicz University, Poland.

Reviewers:

(1) Ahmed Madi Waheed Almayahi, University of Basrah, Iraq.

(2) Manuel Martinez Estevez, Centro de Investigacion Cientifica de Yucatan, Mexico.

Complete Peer review History: <http://www.sdiarticle3.com/review-history/50539>

Received 27 May 2019

Accepted 05 August 2019

Published 17 August 2019

Original Research Article

ABSTRACT

Aims: The objective of this research was to investigate the effect of calcium silicate on gaseous exchanges and production factors in the sweet pepper, cultivated under conditions of soil salinity induced by potassium fertilization, in protected cultivation.

Study design: The experiment was arranged in a randomized complete block design in a 2 × 5 factorial scheme with five replications.

Place and Duration of Study: The experiment was conducted in the sector of Olericultura and Experimentation of the course of Agronomy from October 12, 2018 to February 2019.

Methodology: The experiment was arranged in a randomized complete block design in a 2 × 5 factorial scheme (two sources of correction: limestone and silicon and five increasing rates of KCl equivalent to 150, 300, 450, 600 and 700 kg ha⁻¹ of K₂O). Ten treatments with five replicates where each experimental unit consisted of a polyethylene pot, with a volume of 19 dm³. The electrical conductivity, the determination and quantification of silicon in soil and plant, liquid photosynthesis, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, transpiration, water use efficiency and instantaneous carboxylation efficiency were analyzed.

Results: With the increase of K₂O in the soil there was a tendency of reduction in liquid photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, water use efficiency and instantaneous carboxylation efficiency in the presence and absence of calcium silicate. Higher rates of K₂O (300, 450 and 600 kg ha⁻¹) reduced the length and yield of sweet pepper fruits in the presence and absence of calcium silicate. The rate of 150 Kg K₂O favored the growth of sweet pepper plants in the presence of calcium silicate.

Conclusion: It is concluded from the research that the dose of 300 kg ha⁻¹ of K₂O, in the presence of

calcium silicate, provided the best results for the electrical conductivity of 2.76 dS m^{-1} , silicon content in the soil of 5.70 mg kg^{-1} , 14% silicon leaf content, improving photosynthetic rates, transpiration, water use efficiency and fruit production. The increase in salinity reduced fruit yield, in the presence and absence of Si.

Keywords: *Abiotic stress; photosynthesis; Capsicum annuum; salinization; calcium silicate.*

1. INTRODUCTION

Brazil is among the main sweet pepper producing countries. The main sweet pepper producing states in Brazil are Minas Gerais, São Paulo, Ceará, Rio de Janeiro, Espírito Santo and Pernambuco (87% of the total). It is possible to produce sweet peppers all year round, but it develops better in the summer. Currently, sweet pepper producers have preferred to cultivate this crop in a protected environment, which allows a continuous supply and harvesting in periods of low supply of the product in the market, thus achieving more competitive prices [1].

In the State of São Paulo, in 2018, about 65.800 tons of sweet pepper were produced in 2.560 ha [2]. In the production of vegetables in protected cultivation, it was verified that, after three years of cultivation, many producers do not obtain adequate productivities and quality of the fruits, because there are many problems related to excessive fertilization, leading the soil to an accumulation of salts. The losses suffered by the producers are generated by improper practices of the incorrect management of the fertilization in greenhouse [3]. Therefore, the symptoms of these anomalies in plants under conditions of nutritional imbalance are common, due to the saline stress of the soil solution. Although irrigation water in protected crops is of good quality, the addition of fertilizers, when using the fertigation technique, makes it saline, increasing the risk of soil salinization [4].

Potassium (K) is a nutrient demanded in great quantity by the culture of the sweet pepper, being the main source used by the producers is potassium chloride that has high saline index, being one of the main sources of salinization of the soil in cultivation. Potassium sulfate has a salt content equivalent to half of the salt content of potassium chloride, which makes it more suitable for soils with tendency to salinization [5].

The exogenous application of silicon (Si) significantly improves the development of plants under conditions of salt stress [6]. Calcium silicate can be used as a corrective of soil acidity, neutralizing exchangeable aluminum, providing nutrients to the plant and increasing soil base

saturation [7]. When saline stress occurs, there is a decrease in the relative water content in the leaf, indicating that the plants are exposed to osmotic stress [8]. Studies have shown that Si increases the relative water content in plants under conditions of salt stress [9], decreasing the toxicity of the salts to the plant and improving its growth, increasing the thickness of the leaves, due to deposition of Si, which reduces transpiration and decreases water loss [10].

Due to the condition of soil salinization, nutritional disorders may occur, inducing antagonistic relationships between nutrients in the plant, which significantly reduces crop yields [11]. Elevation of K content in soil can induce nutritional imbalance for plants [12]. However, it is necessary to know the effects of the interactions between saline stress and the use of silicon in the culture of sweet pepper that has been cultivated in protected culture.

Therefore, the present research was conducted to evaluate the effect of calcium silicate on gaseous exchanges and production factors in the sweet pepper under conditions of soil salinity induced by potassium fertilization, in protected cultivation.

2. MATERIALS AND METHODS

The experiment was conducted in the sector of Olericultura and Experimentation of the course of Agronomy from October 12, 2018 to February 2019 in greenhouse. A protective structure model was used, with 225 meters each (9 meters wide by 25 meters long) and right foot of 4 meters. The structure was covered with agrofilm, of blue color. The sweet pepper cultivar Magali R. was used. The seedlings were produced in trays with 128 cells, 6.0 to 6.2 cm high, with substrate composed of inert material and free of pathogens. Transplanting was carried out on November 20, 2018 using a seedling per pot, when they had three to four definitive leaves, which occurred around 35 days after sowing.

The experiment was arranged in a randomized complete block design in a 2 × 5 factorial scheme (two sources of correction: calcareous and silicon and five increasing rates of KCl equivalent to 150, 300, 450, 600 and 700 kg ha⁻¹ of K₂O). It was applied 1.62 ha⁻¹ Mg of calcareous with 80 % total neutralizing power (45 % CaO and 10% MgO) corresponding to 15.39 g pot and 1.87 Mg ha⁻¹ of calcium silicate with total neutralizing power 86% (40.7% SiO₂ and 10% CaO) corresponding to 17.85 g by pot, the source CaSiO₃ used was reagent pure for analysis. Whose treatments and potency equivalence are described in Table 1. Each experimental unit consisted of a 19 dm⁻³ polyethylene pot filled with Oxisol [13], after incubation of calcareous and calcium silicate, fertilization was performed for the macro and micronutrients following the recommendation of [14] and [15] adapted for experiments conducted in pots and for the corn crop.

The soil was classified as Oxisol [16] and samples were collected at a depth of 0-20 cm. The samples were placed to dry, crushed through a 5 mm sieve and mixed to describe the chemical and physical compositions. Chemical and physical compositions of the soil used in this study, according to [17], were: pH in water (1:2.5)= 5.2; level of organic matter (OM)= 1.42 (dag kg⁻¹); P and K by Mehlich I extraction = 3.69 and 30.41 (mg dm⁻³); Mg, Ca and Al extractable by 1 M KCl solution= 7.59, 1.12 and 0.20 (cmol dm⁻³); Si= 3.29 (mg dm⁻³); Zn= 1.05 (mg dm⁻³); Cu= 1.38 (mg dm⁻³); S= 13.24 (mg dm⁻³); B= 0.07 (mg dm⁻³); Fe= 53.62 (mg dm⁻³); T = cation exchange capacity at pH 7.0 (3.62 %); t= cation exchange capacity effective (5.02 %); m = aluminum saturation index (12.50 %); V = Base saturation index (27.85 %). Soil granulometry was the soil physical composition used in this study, determined by the pipette method (sand, silt and Clay = 60 %, 11 % and 29 %). After incubation of calcareous and calcium silicate, fertilization was performed for macro and micro-nutrients following the recommendation of [14] and [15] adapted for experiments conducted in pots for sweet pepper crops. The soil chemical analysis was done at the soil science laboratory

of the Federal University of Lavras, Brazil. The pots had holes in the bottom where a layer of 0.30 m of folded sombrite was placed to avoid soil loss and to allow drainage of excess water, if it occurred.

Before the transplanting of the crop, 300 mg dm⁻³ of urea (45 % N), 300 mg dm⁻³ of simple superphosphate (18 % P₂O₅) was applied and incorporated into the soil, pure reagent was used for analysis for both fertilizers. The calculations for soil correction were based on recommendations [18]. For N, the equivalent of 12.22 g of urea per pot was divided into three applications and, for P₂O₅, 72.52 g of simple superphosphate per pot applied at planting was used. Coating fertilizations started at 15 days after transplant (DAT) and were performed biweekly. The basic fertilization for K₂O was made with KCl using pure reagent source for analysis (60 % K₂O), as described in Table 1. After the application of the fertilizer, the soil was moistened for 35 days to favor the chemical reaction of the corrective and fertilizer. The pots were distributed at spacing of 0.63 m between plants and 1.0 m between rows.

The water characterization of the soil was determined by its water retention characteristic curve (Fig. 1). The parameters of the soil water retention curve used in irrigation and irrigation management were obtained based on the model proposed by [18], with the aid of the Solver application of Microsoft Office Excel[®] software ($\theta = 0.4215 \times [1 + (0.2040 \times |\Psi_m|)^{1.8757}]^{-0.4669} + 0.2670$), where: θ = current moisture cm³.cm⁻³ and Ψ_m = stress, kPa. The field capacity was estimated to be equivalent to the voltage and humidity at the inflection point of the retention curve, as proposed by [19]: $\Psi_m = 1 / \alpha [1 / m]^{1/n}$, where: Ψ_m = tension at the inflection point of the curve, kPa; α , m and n = adjustment parameters of the model equation proposed by [18]. The moisture value in the field capacity found was 0.3458 cm³.cm⁻³ for a voltage of 4.25. Soil moisture was determined through tensiometers, using the water potential of -35 kPa, considered as adequate for the development of the crop [20].

Table 1. Treatments and equivalence in pots based on the two correctives (calcium silicate and calcareous) and rates of K₂O

Treatments	Corrective		K ₂ O rates kg ha ⁻¹ of K ₂ O	
T1	Calcium silicate	-	150	-
T2	Calcium silicate	-	300	-
T3	Calcium silicate	-	450	-
T4	Calcium silicate	-	600	-
T5	Calcium silicate	-	700	-

T6	-	Calcareous	-	150
T7	-	Calcareous	-	300
T8	-	Calcareous	-	450
T9	-	Calcareous	-	600
T10	-	Calcareous	-	700

The irrigation was done by drip irrigation; the self-compensating emitters being manually inserted in polyethylene hoses. The calculation of the operating time of the irrigation system was made based on the humidity sensors (tensiometers) installed in the depth of 0.15 m. With the observed stresses, the corresponding moisture values were estimated from the water retention curve in the soil.

With these moistures and the one corresponding to -30 kPa [15] and, considering the effective depth of the root system (0.15 m), the net and gross replacement slides were calculated for the treatments. Aiming at the replacement of soil water, two readings were performed daily in the tensiometers, one in the morning (8:00 am) and one in the afternoon (14:00 pm).

At the end of the experiment (120 days after plant transplantation), the electrical conductivity (EC) was determined in the saturated paste extract [21], which is the method used as reference for EC determination and adopted in various regions of the world. To do so, the soil passed through the 2 mm sieve and allowed to stand for 24 h to air dry. Afterwards, 800 g of soil were added in plastic containers, with capacity for 1200 mL, with 500 mL of distilled water added. After the mixture turned into a paste, the container was covered with foil remaining for 24 h. After this time, the slurry was again stirred, standing for 1 h. By means of the vacuum filtration of the saturation paste, the solution of the soil was extracted, after which the EC reading was measured. The electrical conductivity of the saturated pulp was corrected considering the soil water retention characteristic using a digital conductivity meter (Lutron, model CD-4303).

For the quantification of the silicon in the soil, soil samples were taken from the pots grown with sweet pepper and prepared for analysis. The samples were dried at room temperature (TFSA) and subsequently sieved (<2,0 mm). The extraction procedure was performed to maintain the same soil: solution ratio, that is, for each 10 g of soil, 100 mL of extractor was added. The extractors used were: Acetic acid 0,5 mol L⁻¹ [22]: 100 mL of 0.5 mol L⁻¹ acetic acid was added to a 150 mL plastic flask containing 10 g de soil. The plastic bottle was capped and shaken

horizontally for one hour. After 30 minutes, the extract was filtered (plastic funnel), using filter paper number 42; Buffer pH 4.0: 100 mL of a buffered solution at pH 4.0 acetic acid plus sodium acetate (49.2 mL of concentrated acetic acid and 14.800 g of anhydrous sodium acetate were dissolved in 1,0 liter of distilled water, and the pH adjusted to 4.0 with the addition of acetic acid) were added in a 150 mL plastic flask with 10 g soil and shaken horizontally for one hour. The vials were then held for 30 minutes and then the plastic funnel extract and filter paper number 42 filtered; Calcium chloride 0.0025 mol L⁻¹ [23]: 100 mL of a 0.0025 mol L⁻¹ calcium chloride solution was added in a plastic flask containing 10 g of soil. Thereafter, it was shaken horizontally for 15 minutes and then decanted from overnight. The following day, the extracts were filtered (plastic funnel and filter paper number 42); Water: 100 mL of distilled and demineralized water were added in 150 mL plastic bottles with 10 g of soil. Henceforth, the procedure was the same as for acetic acid.

The determination of Si in the extract was made by mixing 10 mL of the extract (filtrate / decanting) in 1 mL of sulfo-molybdenum 7.5% solution (7.5 g ammonium molybdate in 10 mL + ac. sulfuric 9 mol L⁻¹ in 100 mL). After 10 minutes 2 mL of the 20% tartaric acid solution was added and after 5 minutes 10 mL of the 0.3% ascorbic acid solution was added. After one hour, the Si was read in a spectrophotometer and at the wavelength of 660nm. The quantification of silicon in the leaves was performed by the colorimetric method of molybdenum blue in the laboratory of mineral nutrition of plants in the Laboratory of Mineral Nutrition of Plants of the Federal University of Uberlandia, Brazil [24].

The shoot dry matter (leaves + stem) was collected at 120 days after transplanting (DAT), to determine dry shoot mass (MMSPA). To dry the material an oven was used at 70 °C with forced ventilation until constant mass was reached. The shoot + stem were processed together. The heights of the plants (m) were evaluated with the help of a scale, measuring the distance between the base of the plant collar to the end of the main stem, the production, which was determined throughout the reproductive stage of the plants, and also the diameter, length, weight and diameter of commercial fruits.

For the analysis of liquid photosynthesis, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, transpiration, water use efficiency and instantaneous carboxylation efficiency, the IRGA model LI-6400XT, (Li-Cor, Lincoln, Nebraska, USA) was used. Two plants of each cultivar were chosen randomly, being defined as the sample unit the sixth leaf from top to bottom, fully expanded and mature. Because it is a species with a composite leaf, the first three leaflets of each leaf were used to measure, totaling six measurements. The value of $850 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of saturation irradiance, defined by the realization of a light curve, was set using the value of radiation that induced the maximum photosynthesis. Sweet pepper is a C3 plant, where a cyclic mechanism of enzymatic reactions converts CO_2 into carbohydrates

through the reductive photosynthetic cycle (C3), generating the 3 phosphoglycerate. Therefore, IRGA camera temperature was controlled at 28°C , since in C3 plants the maximum rate of photosynthesis is reached at relatively low radiation intensity, causing no destruction or damage to the photosynthetic apparatus. Measurements were performed on a 6 cm^2 sheet area.

The results found in the different evaluations were submitted to analysis of variance. For the evaluation of the means, the Scott-Knott or t-test were applied, according to the theories recommended by [25]. The standard deviations were calculated and the correlation estimators (Pearson or Spearman) were used, using SISVAR software [26].

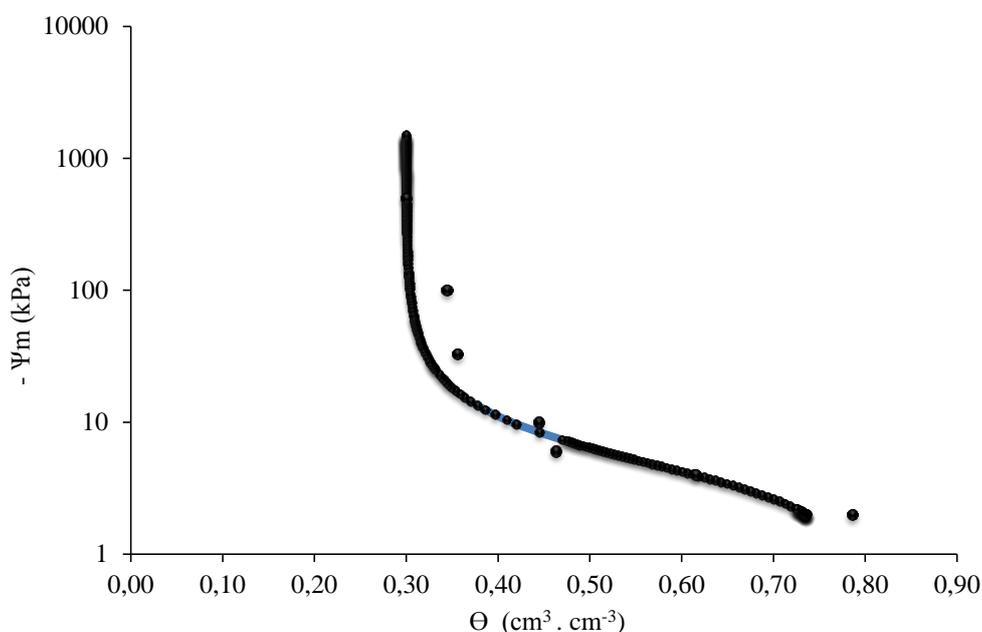


Fig.1. Water retention characteristic curve of the Oxisol used in the experiment (- Ψm= matric potential)

3. RESULTS AND DISCUSSION

The electrical conductivity (EC) of the soil (Fig. 2) increased with increasing rates of K_2O in both correctives (calcium silicate and calcareous). The EC of 2.76 and 2.16 dS m^{-1} were the ones that provided the greatest vegetative development and production, these results agree with those found by [27], who studied the influence of EC on eggplant concluded that the EC of 2.36 dS m^{-1} provided the greatest development and fruiting. The higher dry matter yield of roots, stems, leaves and fruits in eggplant plants was obtained with EC of nutrient solution of 2.10 dS m^{-1} [28].

The use of a rate greater than 60 kg ha^{-1} of K_2O may cause some damage to the legumes due to its saline effect, which may have occurred in this experiment with rates greater than 100 kg ha^{-1} of K_2O [29]. The electrical conductivity increased linearly with the increase of the KCl rate applied in two sources of potassium fertilization, due to the increase of the electrolytic concentration of the soil solution, which is proportional to the increase in the concentration of ions in the solution [30].

The concentration of Si in the soil did not vary in the different rates of K_2O studied when calcium

or calcium silicate was applied (Table 2). However, in the interaction between the rates of K_2O x sources of correctives it was observed that the silicon concentration was higher for the treatment using calcium silicate, due to the fact that it is a soluble source of Si.

For the silicon content in the sweet pepper leaf (Table 3) differences were observed between the rates of K_2O . When the calcium silicate was applied, the highest levels were found with 600 and 700 $kg\ ha^{-1}$ K_2O . As for the interaction between the correctives (calcium silicate x calcareous), independent of the K_2O rate, the higher silicon contents were found when calcium silicate was applied.

With increasing rates of K_2O in the soil there was a tendency of reduction in the liquid photosynthesis (total photosynthesis) (Fig. 3A), transpiration (Fig. 3B), stomatal conductance

(Fig. 3C), intercellular CO_2 concentration (Fig. 3D), water use efficiency (Fig. 3E) and instantaneous carboxylation efficiency (Fig. 3F), in the presence and absence of calcium silicate. However, it was observed that with the application of calcium silicate all these variables presented higher values. The deposition of silicon in plant tissues improves the interception of light and decreases transpiration [31]. Increased availability of Si favors increased productivity, since Si can act indirectly in photosynthetic and biochemical processes, especially when the plant is subjected to some type of stress [32]. The translocation of silicon from the roots to the aerial part of plants may be related to the increase in photosynthetic capacity, greater resistance to possible damage and reduction in the evapotranspiration process, which, consequently, improves the use of available water in the soil [33].

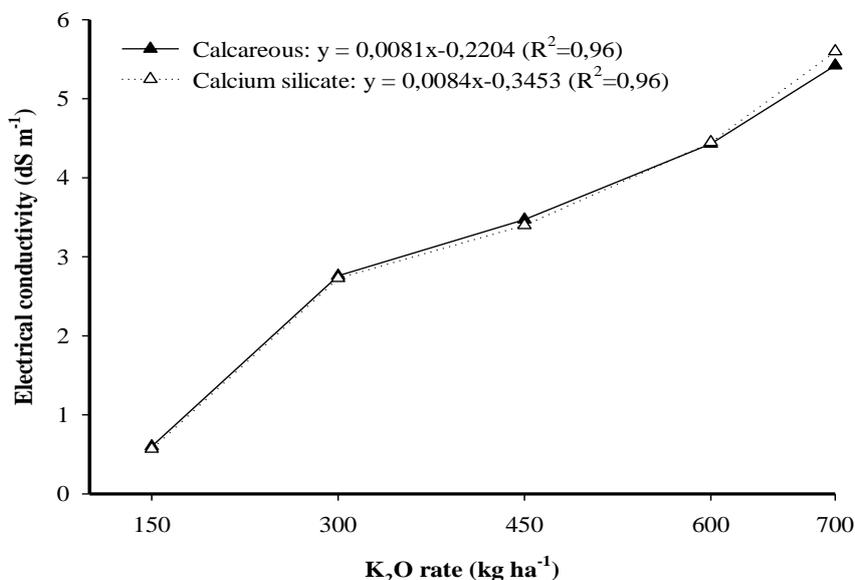


Fig. 2. Electrical conductivity of the soil as a function of the K_2O rates and sources of correctives (calcium silicate and calcareous)

Table 2. Soil silicon content in $CaCl_2\ 0.01\ mol\ L^{-1}$ as a function of K_2O rates and corrective sources (calcareous and calcium silicate)

K_2O rates ($kg\ ha^{-1}$)	Calcium silicate	Calcareous
	Content tho Si ($mg\ kg^{-1}$)	
150	6.00 Aa	5.00 Ab
300	5.70 Aa	5.00 Ab

450	5.80 Aa	4.80 Ab
600	5.75 Aa	5.00 Ab
700	6.00 Aa	5.20 Ab

Capital letters equal in the column, do not differ at the level of significance of 5%; Minor letter in the same line, do not differ at the level of significance of 5%

Table 3. Silicon content in the leaf (%) as a function of K₂O rates and corrective sources (calcareous and calcium silicate)

K ₂ O rates (kg ha ⁻¹)	Calcium silicate	Calcareous
	Content tho Si (%)	
150	13 Ca	12 Ab
300	14 Ca	12 Ab
450	18 Ba	13 Ab
600	20 Aa	13 Ab
700	20 Aa	14 Ab

Capital letters equal in the column, do not differ at the level of significance of 5%; Minor letter in the same line, do not differ at the level of significance of 5%

The increase in CO₂ concentration inside leaves promotes the closure of stomata, which may occur in response to a biotic stress [34]. This CO₂ concentration may be directly related to the increase in transpiration, which was greater than 0,006 mmol H₂O m⁻²s⁻¹ (Fig. 3B). The increase in transpiration by plants is mainly due to the inability of some plants to absorb enough water to replenish that consumed in the transpiration process, and the loss of water by plants is regulated by the activity of the guard cells. As temperature rises, relative air humidity decreases and responses of metabolic processes in plants will reflect the interaction between transpiration and guard cell activities [35].

The efficiency in the use of water by sweet pepper plants demonstrates a relationship between photosynthesis and transpiration in which the observed values are directly related to the amount of carbon that the plant fixes for each unit of water it loses [36]. In this sense, decreases observed in water use efficiency (Fig. 3E) are reflective of increases in the rate of carbon dioxide assimilation and transpiration of plants. As for the instantaneous efficiency of carboxylation (Fig. 3F).

The results obtained in this work indicate that the increase in the instantaneous efficiency of

carboxylation is related to the increase in the concentration of CO₂ and to the gains related to the rate of assimilation of CO₂ [37]. Point out that this efficiency is related to the intercellular CO₂ concentration and the rate of assimilation of CO₂. The CO₂ assimilation from the external environment promotes water loss, which restricts CO₂ entry [35]. The gas exchanges, are influenced by climatic conditions, so the reduction in the efficiency of water use may be related to the increase of solar radiation, temperature and relative humidity.

It is noteworthy that the stomatal behavior determines the transpiratory requirement of the plants, thus controlling the loss of water in the form of vapor. Although Si is not considered an essential element for plants, studies show that its application to the soil contributes to the growth and increase of productivity [38], as can be observed in this work (Table 3). In saline stress conditions, the plant growth is compromised due to the reduction of the osmotic potential of the soil solution, which reduces the water potential of the plants [39]. According to [40], this reduction of the water potential of the plants can be mitigated by the application of Si, which reduces the toxicity caused by excess sodium chloride in the soil solution.

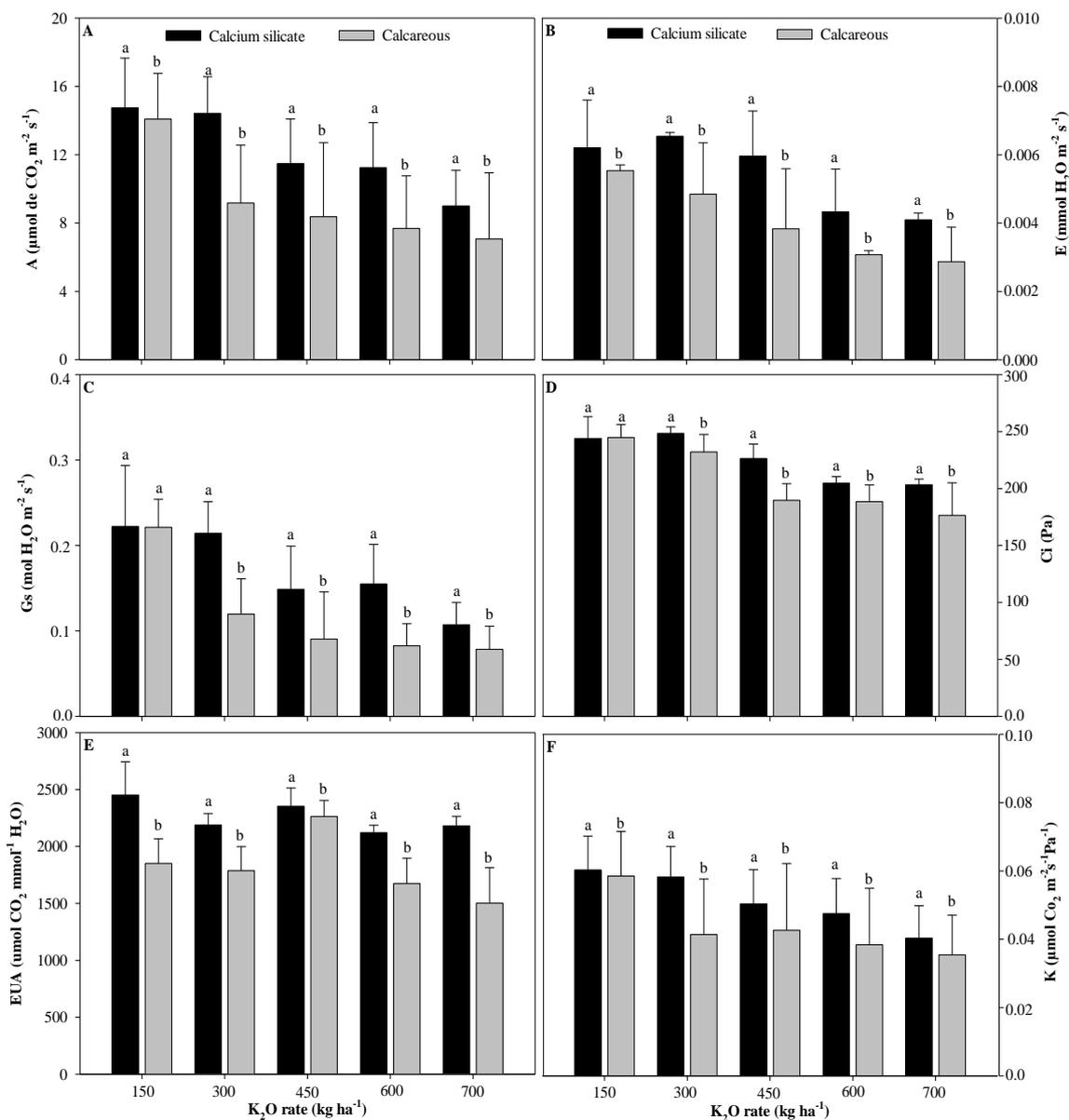


Fig. 3. Liquid photosynthesis (A), transpiration (B), stomatal conductance (C), intercellular CO₂ concentration (D), water use efficiency (E) and instantaneous efficiency of carboxylation (F) as a function of presence and absence of calcium silicate and rate of K₂O

The production and weight of sweet pepper fruits were higher when the 150 kg K₂O rate was applied in the presence and absence of calcium silicate (Fig. 4A and 4B). Higher rates of K₂O reduced sweet pepper production (Fig. 4A) and caused a significant decrease in plant height (Fig. 4E). There was a reduction in the length of the chili fruits when the K₂O rates increased, in the presence and absence of calcium silicate (Fig. 4C). The application of calcium silicate favored the increase of the diameter of the fruits in the rates of K₂O studied (Fig. 4D). The beneficial effects of Si on the growth have been reported in a wide of plant species, which are characterized by protecting the plant from

various biotic and a biotic stresses [41]. Transporters responsible for Si unloading from xylem in leaves also have been identified in many plant species [42]. The aerial plant parts accumulate more Si than roots [43]. Deposition of Si takes place in different parts of plant such as epidermis of shoots but can also occur in the cell wall of root endodermis [10]. However, phytoliths formation, composition, and localization vary among plant species [44].

The rate of 150 Kg K₂O favored the growth of sweet pepper plants in the presence of calcium silicate. In Fig. 4C it is observed that, as increasing rates of K₂O were applied, there was

reduction in fruit length. Under conditions of higher salinity and osmotic pressure of the soil solution the absorption of water from the root cells decreases, allowing the occurrence of ionic toxicity. The addition of 16.6 g KCl m⁻² reduced root yield and P uptake by sweet pepper plants

cultivated on an Oxisol with 24.0 g dm⁻³ of organic matter [3] in addition, [8] reported that high salinity promotes changes in photosynthesis (CO₂ assimilation, stomatal conductance and leaf transpiration), thus inhibiting plant growth and reducing its height, as shown in Fig. 4E.

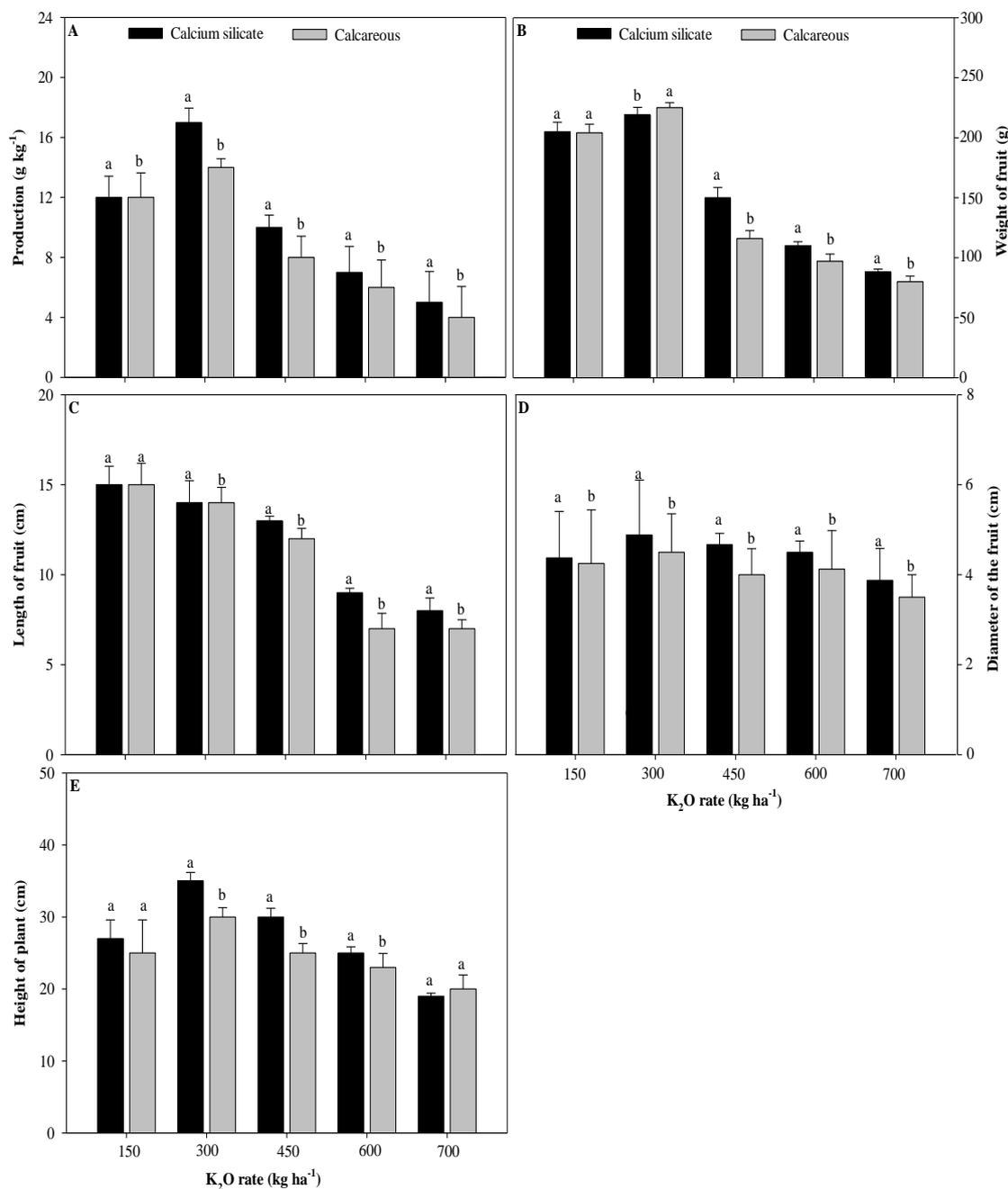


Fig. 4. Production (A), fruit weight (B), fruit length (C), fruit diameter (D) and plant height (E) as a function of the presence and absence of calcium silicate and K₂O rates

4. CONCLUSION

It is concluded from the research that the dose of 300 kg ha⁻¹ of K₂O, in the presence of calcium silicate, provided the best results for the electrical conductivity of 2.76 dS m⁻¹, silicon content in the soil of 5.70 mg kg⁻¹, 14% silicon leaf content, improving photosynthetic rates, transpiration, water use efficiency and fruit production. The increase in salinity reduced fruit yield, in the presence and absence of Si.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Foundation for Research Support of the State of Minas Gerais (FAPEMIG/Brazil) for the financing of this project and granting a doctorate grant and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq/Brazil), for the productivity of advisor.

COMPETING INTERESTS

Authors have declared that no competing interests exist.

REFERENCES

1. Marques DJ, Broetto F, Ferreira MM, Lobato AKS, Avila FW. Effect of potassium sources on the antioxidant activity of eggplant. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2014; 38 (6): 1836-1842.
2. IEA - Instituto de Economia Agrícola. Base de Dados: Estatísticas de Produção Paulista, 2019. Disponível em : <http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&language=1>. (Acesso em: 12 Jul 2019).Portuguese.
3. Haynes RJ. Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. *Fertilizer Research*, The Hague.1985; 6 (3): 235-255.
4. Maas EV, Hoffman GJ. Crop salt tolerance, currents assessment. *Journal Irrigation and Drainage Divison*. 1977; 103 (2): 115-114.
5. Carneiro MA. Soil salinity and yield of mango fertigated with potassium sources. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*. 2017; 21 (5): 310-316.
6. Rahimi R, Mohammakhani A, Roohi V, Armand N. Effects of salt stress and silicon nutrition on chlorophyll content, yield and yield components in fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 2012; 4 (21): 1591-1595. Available: <<http://ijagcs.com/wp-content/uploads/2012/11/1591-1595.pdf>> (Accessed: 22 May 2019)
7. Caires EF, Joris HAW. Uso de corretivos granulados na agricultura. IPNI - International Plant Nutrition Institute. 2016; 154 (17): 17–21. Disponível em: <<http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/issue/IA-BRASIL-2016-156?OpenDocument&toc=0>>.Acesso em: 06 Jun. 2019. Portuguese.
8. Fahad S, Hussain S, Matloob A, Khan FA, Khaliq A, Saud S, Hassan S, Shan D, Khan F, Ullah N. Phytohormones and plant responses to salinity stress: a review. *Plant Growth Regulation*. 2015; 75 (2): 391–404. Available: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10725-014-0013-y>> (Accessed: 22 May 2019)
9. Etesami H, Jeong BR. Silicon (Si): Review and future prospects on action mechanisms in alleviating biotic and a biotic stress in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018; 147:881-896. Available:<<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>> (Accessed: 23 Apr 2019).
10. Keller C, Rizwan M, Davidian JC, Pokrovsky OS, Bovet N, Chaurand P, Meunier JD. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 µM Cu. *Planta*. 2015; 241 (4): 847–860. Available: <<https://doi.org/10.1007/s00425-014-2220-1>> (Accessed: 12 Feb 2019).
11. Grattan SR, Grieve CM. Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments. *Agriculture Ecosystem & Environment*. 1992; 38 (4): 203-226. Available: <[https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90151-Z](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90151-Z)> (Accessed: 12 Apr 2019).

12. Hagin J, Tucker B. Fertilization of dryland and irrigated soils. *Advanced Series in Agricultural Sciences*, Berlin: Springer-Verlag. 1982; 12: 188-198. Available: <<https://www.springer.com/gp/book/9783642683299>> (Accessed: 12 May 2018).
13. Santos HG, Jacomine PKT, Angels LHC, Oliveira VA, Oliveira JB, Rabbit MR, Lumbreras JF, Wedge TJF. *Brazilian Soil Classification system*. 2th ed. Rio de Janeiro; 2006.
14. Novais RF, Neves JCL, Barros, NF. *Métodos de pesquisa de fertilidade do solo*. 1th ed. Brasília: EMBRAPA-SEA; 1991. Portuguese.
15. Marques DJ, Ferreira MM, Lobato AKS, Carvalho JG, Carvalho JA, Freitas WA, Bastos ARR, Pereira FJ, Castro EM. CaSiO₃ improves water potential and gas exchange but does not contribute to the production parameters of maize plants exposed to different irrigation depths. *Australian Journal of Crop Science*. 2014; 8 (8): 1257-1265.
16. EMBRAPA. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5th ed. Brasília; 2013. Portuguese.
17. Van Raij B, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA. *Chemical analysis for fertility evaluation of tropical soils*. Campinas Agronomic Institute. 2001. Available: <<http://dx.doi.org/10.4236/eng.2011.34046>> (Accessed: 02 Jul 2019).
18. Van Genuchten MT. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils1. *Soil Science Society of America Journal*. 1980; 44 (5): 892-898. Available: <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>> (Accessed: 13 Jun 2019).
19. Dexter AR. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. 2004; 120 (3-4): 201-214. Available: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>> (Accessed: 5 Apr 2019).
20. Reichardt K, Timm IC. *Soil, Plant and Atmosphere*. 2th.ed. Barueri, SP; 2012.
21. Richards LA. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington: US Department of Agriculture. (USDA Agricultural Handbook, 60).1954; p.160.
22. Snyder GH. Development of a silicon soil test for Histosol-grown rice. Belle Glade, Univ. Florida, 1991. (EREC Res.Report.).
23. Kilmer VJ. Silicon. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy. 1965; p959-962. (Monograph 9).
24. Furlani P, Gallo JR. Determinação de silício em material vegetal, pelo método colorimétrico do "azul-de-molibdênio". *Bragantia*. 1978; 37 (1): 5-11. Portuguese.
25. Steel RGD, Torrie JH, Dickey DA. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. 3th ed. Moorpark: Academic Internet Publishers; 2006.
26. Ferreira D. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*. 2011; 35 (6): 1039-1042.
27. Souza SV, Soares I, Crisostomo LA, Silva LA, Hernandez FFF. Influência da condutividade elétrica da solução nutritiva na acumulação de matéria seca e teores de nutrientes em berinjela cultivada em pó de coco. *Revista Ciência Agrônômica*. 2005; 36 (2): 123-128. Portuguese.
28. Savvas D, Lenz F. Effects of NaCl concentration on nutrient solutions on mineral composition of eggplants growth, yield, and composition of eggplants grown on rockwool. *Scientia Horticulturae*. 2000; 84 (1-2): 37-47.
29. Guareschi RF, Gazolla PR, Souchie EL, Rocha AC. Adubação fosfatada e potássica na semeadura e a lanço antecipada na cultura da soja cultivada em solo de Cerrado. *Semina: Ciências Agrárias*. 2008; 29 (4): 769-774. Portuguese.
30. Marques DJ, Broetto F, Ferreira MM, Lobato AKS, Avila FW. Effect of potassium sources on the antioxidant activity of eggplant. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2014; 38 (6): 1836-1842.
31. Bianchini HC, Marques DJ. Tolerance to hydric stress on cultivars of silicon-fertilized corn crops: absorption and water-use efficiency. *Bioscience Journal*. 2019; 35 (2): 527-539.
32. Abdalla MM. Beneficial effects of diatomite on growth, biochemical contents and polymorphic DNA in

- Lupinus albus plants grown under water stress. *Agriculture and Biology Journal of North America*. 2011; (2): 207-220.
33. Mancuso MAC, Soratto RP, Crusciol CAC, Castro GSA. Effect of potassium sources and rates on arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2014; 38 (5): 1448-1456. Available: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000500010>> (Accessed: 31 Jul 2019).
 34. Ribaut JM, Betran J, Monneveux P, Setter T. Drought Tolerance In Maize. In: Bennetzen JL, Hake SC. (Ed.) *Handbook of maize: its biology*. New York: Springer. 2009. 311-344p. Available: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-79418-1_16> (Accessed: 01 Apr 2019).
 35. Shimazaki K, Doi M, Assmann SM, Kinoshita T. Light regulation of stomatal movement. *Annual Review of Plant Biology*. 2007; 58 (1): 219-247. Available: <<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105434>> (Accessed: 12 Jun 2019).
 36. Jaimez RE, Rada F, Garcia-Núñez C, Azócar A. Seasonal variations in leaf gas exchange of plantain cv. 'Hartón' (Musa AAB) under different soil water conditions in a humid tropical region. *Scientia Horticulturae*. 2005; 104 (1): 79-89. Available: <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.07.002>> (Accessed: 01 Jan 2019).
 37. Machado EC, Schmidt PT, Medina CL, Ribeiro RV. Photosynthesis responses of three citrus species to environmental factors. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2005; 40 (12): 1161-1170. Available: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2005001200002>> (Accessed: 15 Feb 2019). Portuguese.
 38. Marafon AC, Endres L. Silicon: fertilization and nutrition in higher plants. *Revista Ciências Agrárias*. 2013; 56 (4):80–88. 2013. Available: <<http://dx.doi.org/10.4322/rca.2013.057>> (Accessed: 01 Feb 2019).
 39. Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 2008; 59 (1): 651-681. Available: <<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>> (Accessed: 21 Jun 2019).
 40. Zhu Z, Wei G, Li J, Qian Q, Yu Z. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science*. 2004; 167 (3): 527-533. Available: <<http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300943379>> (Accessed: 17 Mai 2019).
 41. Ma JF, Yamaji N, Mitani-ueno N. Transport of silicon from roots to panicles in plants. *Proceedings of the Japan Academy*. 2011; 87 (7): 377–385. Available: <<https://dx.doi.org/10.2183%2Fpjab.87.377>> (Accessed: 01 Apr 2019).
 42. Yamaji N, Chiba Y, Mitani-Ueno N, Ma JF. Functional characterization of a silicon transporter gene implicated in silicon distribution in Barley. *Plant Physiol*. 2012; 160(3): 1491-1497. Available: <<https://doi.org/10.1104/pp.112.204578>> (Accessed: 01 Apr 2019).
 43. Hodson MJ, White PJ, Mead A, Broadley MR. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*. 2005; 96(6): 1027-1046. Available: <<https://doi.org/10.1093/aob/mci255>> (Accessed: 20 Mar 2019).
 44. Li H, Zhu Y, Hu Y, Han W, Gong H. Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2015; 37 (4): 2015. Available: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11738-015-1818-7>> (Accessed: 01 Jan 2019).

CAPÍTULO 3

ARTIGO 2

(Artigo formatado de acordo com as normas da Revista Horticultura Brasileira ISSN: 1806-9991 – B1)

SILICATO DE CÁLCIO COMO ATENUANTE DO ESTRESSE SALINO EM PIMENTÃO

Márcio de S Dias¹, Douglas J Marques¹ e Hudson C Bianchini¹

¹Universidade José do Rosário Vellano (UNIFENAS), Alfenas – MG, Brazil; marciodesouzadias2013@gmail.com (autor correspondente); douglas.marques@unifenas.br; hudson.bianchini@unifenas.br

RESUMO

Na correção da acidez do solo o silicato de cálcio pode desempenhar a mesma função do calcário, além de fornecer silício (Si) para as plantas. O Si é considerado um elemento benéfico, que pode mitigar estresse relacionado à salinidade do solo. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito do silicato de cálcio, em cultivo protegido de pimentão, sob duas condições de salinidade no solo, induzidas por adubação potássica. O experimento foi disposto em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 2×2 utilizando duas fontes de corretivo: calcário e silicato de cálcio e duas concentrações de K_2O no solo, tratamento controle ($150 \text{ kg } K_2O \text{ ha}^{-1}$) e estresse salino ($700 \text{ kg } K_2O \text{ ha}^{-1}$), totalizando 4 tratamentos, com 5 repetições. Foram avaliados a condutividade elétrica, a translocação do Si na planta, a eficiência do uso da água, a eficiência instantânea da carboxilação e o índice de estresse. A translocação do silício foi significativamente superior nos tratamentos que receberam silicato de cálcio, quando comparados aos que receberam calcário, e em condições de estresse a translocação do Si foi equivalente a 100% quando comparado ao controle; da mesma forma, o uso de silicato de cálcio atuou positivamente na eficiência instantânea no uso da água, cerca de $2,220 \mu\text{mol } CO_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2O$ (73%), quando comparados os tratamentos que receberam calcário $1,800 \mu\text{mol } CO_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2O$ (controle / 60%) e $1,500 \mu\text{mol } CO_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2O$ (estresse / 50%). Em condições de estresse salino no solo, o uso do silicato de cálcio proporciona maior translocação de Si na planta de pimentão, aumenta a eficiência no uso da água e a eficiência instantânea da carboxilação, reduzindo o índice de estresse.

Palavras-chave: *Capsicum annuum* L., condutividade elétrica, fertilização silicatada, salinidade;

CALCIUM SILICATE AS ATTENUATING SALIN STRESS IN SWEET PEPPER

ABSTRACT

In correcting soil acidity, calcium silicate can perform the same function as limestone, in addition to providing silicon (Si) to plants. Si is considered a beneficial element that can mitigate stress related to soil salinity. The objective of this research was to evaluate the effect of calcium silicate in protected pepper cultivation under two soil salinity conditions induced by potassium fertilization. The experiment was arranged in a randomized block design in a 2×2 factorial scheme using two corrective sources: limestone and calcium silicate and two soil K_2O concentrations, control treatment ($150 \text{ kg } K_2O \text{ ha}^{-1}$) and saline stress ($700 \text{ kg } K_2O \text{ ha}^{-1}$), totaling 4 treatments, with 5 repetitions. Electrical conductivity, Si translocation in the plant, water use efficiency, instantaneous carboxylation efficiency and stress index were evaluated. Silicon translocation was significantly higher in calcium silicate treatments compared to limestone, and under stress conditions Si translocation was equivalent to 100% when compared to control; similarly the use of Calcium had a positive effect on instant water use efficiency, about $2,220 \mu\text{mol } CO_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2O$ (73%), when compared to treatments that received limestone $1,800 \mu\text{mol } CO_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2O$ (control / 60%) and $1,500 \mu\text{mol } CO_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2O$ (stress / 50%). Under conditions of saline stress in the soil, the use of calcium silicate provides greater translocation of Si in the pepper plant, increases water use efficiency and instant carboxylation efficiency, reducing stress index.

Keywords: *Capsicum annuum* L., electrical conductivity, silicate fertilization, salinity;

INTRODUÇÃO

O cultivo protegido de pimentão com fertirrigação, embora reduza o problema com lixiviação do nutriente, pode resultar em aumento do potencial salino no solo e, conseqüentemente, redução da produtividade da planta.

A cultura do pimentão apresenta grande sensibilidade ao estresse salino, sendo que condutividade elétrica (CE) acima de $1,0 \text{ dSm}^{-1}$ interfere diretamente na produtividade da cultura (Hussein *et al.*, 2012). Portanto, o monitoramento da CE na solução solo e a

concentração de íons específicos, como potássio (K), são práticas que devem ser adotadas no cultivo de pimentão em ambiente protegido (Oliveira et al., 2015). O estresse salino reduz a produção do pimentão, que é muito sensível aos efeitos da salinidade, interferindo diretamente no desenvolvimento da cultura (Tehseen *et al.*, 2016).

O Si compõe cerca de 27,7% da crosta terrestre, sendo o segundo elemento mais abundante na natureza, combinado com outros elementos, ocorrendo basicamente sob duas formas, sílica e óxidos de Si, que existem em formas cristalinas ou amorfas (Marafon & Endres, 2013). Estudos realizados com a aplicação de silicatos no solo promovem o aumento do pH e a redução dos teores H^+ e Al^{3+} , devido a capacidade do SiO_3^{-2} em neutralizar a acidez, além de proporcionar aumento na disponibilidade de fósforo (P) e cálcio (Ca) no solo (Menegale *et al.*, 2015).

De acordo com Alcarde & Rodella (2003), o silicato de cálcio apresenta solubilidade 6,78 vezes maior que o carbonato de cálcio, apresentando, portanto, um maior potencial para a correção da acidez do solo em profundidade que o calcário. Castro & Crusciol (2013) observaram que após 18 meses da aplicação do silicato de cálcio os produtos dissociados do silicato atingiram as camadas mais profundas do solo em comparação com a calagem. Na agricultura, o uso do Si apresenta vários benefícios, dentre os quais se destacam a tolerância aos estresses salino e hídrico, conferindo certo grau de tolerância das plantas, pois a presença do elemento diminui a concentração de sais na planta, diminuindo a transpiração e reduzindo o transporte de sódio (Na) nas raízes (Castellanos *et al.*, 2016).

Altas doses de fertilizantes são aplicadas em diferentes culturas visando obter altos rendimentos, entretanto esta prática aumenta a concentração de sais do solo (Oliveira *et al.*, 2013); estas altas concentrações promovem alterações fisiológicas na planta, que podem promover redução do crescimento, alterações na permeabilidade da membrana, redução da condutância estomática e alterações na atividade fotossintética (Pinheiro et al., 2019).

Na cultura do pimentão doses elevadas de K_2O , superiores a 8,8 g por planta, proporcionam perda na qualidade dos frutos e, conseqüentemente, na produção, sendo recomendada a dose 80 kg ha^{-1} de K_2O (Santos *et al.*, 2018).

Dentro deste contexto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito do silicato de cálcio no cultivo protegido de pimentão, sob duas condições de salinidade no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no setor de Olericultura e Experimentação do Departamento de Agronomia da Universidade José do Rosário Vellano (Unifenas), Alfenas, MG. O período experimental teve duração de 120 dias, sendo realizado de outubro de 2018 a fevereiro de 2019. Para o cultivo protegido foi utilizada uma estrutura de proteção modelo Arco Geminada, com 225 metros cada (9 metros de largura por 25 metros de comprimento) e pé direito de 4 metros.

Utilizou-se a cultivar de pimentão Magali R. As mudas foram produzidas em bandejas com 128 células, com 6,0 a 6,2 cm de altura, com substrato composto por material inerte e livre de patógenos. O transplântio foi realizado 35 dias após a sementeira, quando as plantas apresentavam três a quatro folhas definitivas, foi utilizada uma muda por vaso.

O experimento foi disposto em delineamento com blocos casualizados, em esquema fatorial 2×2 , sendo duas fontes de corretivo (calcário e Si) e duas doses de KCl (controle: equivalente a 150 kg ha^{-1} e estresse salino 700 kg ha^{-1} de K_2O), totalizando quatro tratamentos com cinco repetições. Cada unidade experimental foi constituída por um vaso de polietileno, com volume de 19 dm^3 , preenchido com Latossolo Vermelho Distoférrico de textura média (Santos et al., 2006), coletado a uma profundidade de 0 a 20 cm.

Utilizou-se calcário com 80 % de poder neutralizante total (45 % CaO e 10 % MgO) e silicato de cálcio com poder neutralizante total de 86 % (40,7 % SiO_2 e 10 % CaO), sessenta dias antes do transplântio. As doses K_2O foram indicadas com base nas recomendações de Novais *et al.* (1991) para a cultura do pimentão, utilizando KCl (58 % K_2O), cujos tratamentos estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Tratamentos e equivalência em vasos com base nos dois corretivos (silicato de cálcio e calcário) e doses de K_2O .

Tratamentos	Corretivos		Doses de K_2O kg ha^{-1} de K_2O	
Controle	Silicato de cálcio	-	150	-
Estresse	Silicato de cálcio	-	700	-
Controle	-	Calcário dolomítico	-	150
Estresse	-	Calcário dolomítico	-	700

A análise química do solo utilizado apresentou os seguintes resultados: matéria orgânica, 19 g dm^{-3} ; pH (CaCl_2), 6,1; pH (H_2O), 6,6; Ca, 34 mmolc dm^{-3} ; Mg, 24 mmolc dm^{-3} ; Al, $0,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$; K, 3 mmolc dm^{-3} ; P (Mehlich), 5 mg dm^{-3} ; e saturação por bases de 73%. O solo passou pela peneira de 5 mm, sendo acondicionado nos vasos com capacidade para 19 dm^3 . Foram feitos furos no fundo do vaso, onde foi colocada uma camada de 0,30 m de sombrite dobrada para evitar perda de solo e para permitir a drenagem do excesso de água, caso ocorresse.

Os cálculos para a correção da acidez do solo foram feitos visando à elevação da saturação por bases a 80% e as recomendações de adubação de N e P_2O_5 foram baseadas nas recomendações preconizadas por Novais *et al.* (1991) para experimentos em vasos. A adubação nitrogenada foi feita com 12,22 g de ureia por vaso, dividida em 3 aplicações e a adubação fosfatada foi feita com 72,52 g de superfosfato simples por vaso. As adubações em cobertura tiveram início aos 15 dias após transplante (DAT), sendo realizadas quinzenalmente. Foi utilizado o KCl como fonte de adubação potássica (Tabela 1). Após a aplicação dos adubos manteve-se o solo úmido durante 35 dias, para favorecer as reações químicas do corretivo e dos fertilizantes. Os vasos foram distribuídos em espaçamento de 0,63 m entre plantas e 1,0 m entre linhas.

Para avaliação do potencial matricial do solo foram instalados tensiômetros em cada vaso na profundidade efetiva do sistema radicular (0,20 m), a uma distância vertical de 0,30 m da superfície do mercúrio na cuba até a superfície do solo e a 0,15 m de distância do colo das plantas.

A caracterização hídrica do solo foi determinada pela sua curva característica de retenção de água (Figura 1). Os parâmetros da curva de retenção de água no solo, usados na quantificação da lâmina de irrigação e no manejo da irrigação foram obtidos com base no modelo proposto por Genuchten (1980), com auxílio do aplicativo Solver do software Microsoft Office Excel[®] ($\theta = 0,4215 \times [1 + (0,2040 \times |\Psi_m|)^{1,8757}]^{-0,4669} + 0,2670$), em que: θ = umidade atual $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e Ψ_m = tensão, kPa. A capacidade de campo foi estimada como sendo equivalente à tensão e à umidade no ponto de inflexão da curva de retenção, conforme proposição de Dexter (2004): $\Psi_m = 1/\alpha [1/m]^{1/n}$, em que: Ψ_m = tensão no ponto de inflexão da curva, kPa; α , m e n = parâmetros de ajuste da equação do modelo proposto por Genuchten (1980). O valor de umidade na capacidade de campo encontrado foi de $0,3458 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para uma tensão de 4,25. A umidade do solo foi determinada através de tensiômetros, utilizando-se

o potencial hídrico de -35 kPa, considerado como adequado para o desenvolvimento da cultura (Reichardt & Timm, 2012).

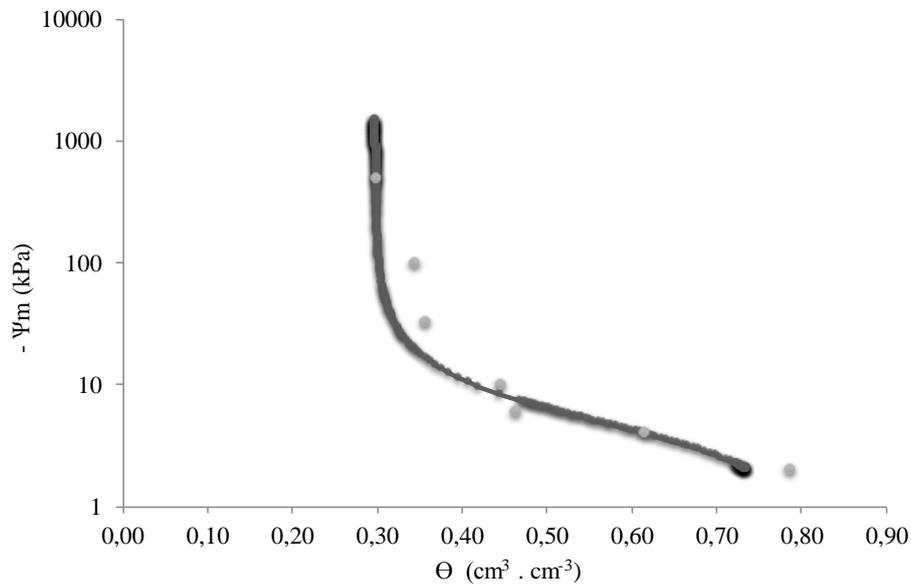


Figura 1. Curva característica de retenção de água do Latossolo Vermelho utilizado no experimento (- Ψm= potencial matricial).

A irrigação foi feita por gotejamento, sendo os emissores autocompensantes inseridos manualmente em mangueiras de polietileno. O cálculo do tempo de funcionamento do sistema de irrigação foi feito com base nos sensores de umidade (tensiômetros) instalados a profundidade de 0,20 m. Com as tensões observadas, foram estimadas as umidades correspondentes a partir da curva de retenção de água no solo. De posse dessas umidades e com aquela correspondente à -30 kPa (Marques *et al.*, 2014) e, ainda, considerando a profundidade efetiva do sistema radicular (0,20 m) foram calculadas as lâminas líquida e bruta de reposição para cada tratamento. Visando efetuar a reposição da água do solo foram realizadas diariamente duas leituras nos tensiômetros, sendo uma pela manhã (8:00 h) e outra à tarde (14:00 h).

Ao final do experimento (120 dias após o transplante) foi quantificada a CE no extrato da pasta saturada do solo, conforme proposto por Richards (1954). O solo passou pela peneira de 2 mm permanecendo em repouso por 24 h para secar ao ar. Após, 800 g de solo foram adicionados a recipientes plásticos, com capacidade para 1200 mL, sendo adicionados 500 mL de água destilada. Depois da mistura se transformar em uma pasta, o recipiente foi coberto com papel alumínio ficando em repouso por mais 24 h. Após este período, a pasta foi

novamente agitada, ficando novamente em repouso por 1 h. Por meio da filtragem a vácuo da pasta de saturação foi extraída a solução do solo, em seguida foi aferida a leitura da CE. A CE da pasta saturada foi corrigida considerada a curva característica de retenção da água no solo, utilizando-se condutivímetro digital (Lutron, mod. CD-4303).

Para a quantificação do Si, amostras de solo foram retiradas dos vasos cultivados com pimentão e preparadas para análise. As amostras foram secas na temperatura ambiente e, posteriormente, peneiradas (<2,0 mm). O procedimento de extração foi realizado procurando-se manter a mesma relação solo: solução, isto é, para cada 10 g de solo, foram adicionados 100 mL de extrator. Os extratores utilizados foram: Ácido acético 0,5 mol L⁻¹ (Snyder, 1991): 100 mL de ácido acético 0,5 mol L⁻¹ foram adicionados em um frasco de plástico de 150 mL que continha 10 g de solo. O frasco de plástico foi tampado e agitado horizontalmente por uma hora. Passados 30 minutos, filtrou-se o extrato (funil de plástico), utilizando-se papel de filtro número 42; Tampão pH 4,0: 100 mL de uma solução tamponada a pH 4,0 de ácido acético mais acetato de Na (49,2 mL de ácido acético concentrado e 14,800 g de acetato de Na e o anidro foram dissolvidos em 1 litro de água destilada e o pH ajustado para 4,0 com a adição de ácido acético) foram adicionados em um frasco plástico de 150 mL com 10 g de solo e agitados horizontalmente por uma hora. A seguir, mantiveram-se os frascos em repouso por 30 minutos e depois filtrou-se o extrato em funil de plástico e papel de filtro número 42; cloreto de cálcio 0,0025 mol L⁻¹ (Kilmer, 1965): 100 mL de uma solução de cloreto de cálcio 0,0025 mol L⁻¹ foram adicionados em frasco de plástico com 10 g de solo. A seguir, agitou-se horizontalmente por 15 minutos e depois ficou decantando por 24 horas. No dia seguinte, os extratos foram filtrados (funil de plástico e papel de filtro número 42); Água: 100 mL de água destilada e desmineralizada foram adicionados em frascos de plástico de 150 mL com 10 g de solo.

A determinação do Si no extrato foi feita misturando-se 10 mL do extrato (filtrado/decantado) com 1 mL da solução sulfo-molibdica 7,5% (7,5 g de molibdato de amônio + 10 mL de ácido sulfúrico 9 mol L⁻¹ em 100 mL). Após 10 minutos foram acrescentados 2 mL da solução ácido tartárico 20% e, após 5 minutos, adicionaram-se 10 mL da solução de ácido ascórbico 0,3%. Depois de uma hora, foi feita a leitura do Si em espectrofotômetro (Kasuki / modelo SKU IL-227-BI) e no comprimento de onda de 660 nm.

A análise de Si nas plantas foi feita seguindo uma adaptação do método descrito por Elliott & Snyder (1991). Pesou-se 0,1000 g da amostra (tecido foliar) e colocou-se em tubo de

plástico. A seguir, foram acrescentados 2 mL de H₂O₂ (30 %) mais 3 mL de NaOH (1:1). Depois de agitados, os tubos foram imediatamente colocados na autoclave por um período de 1 h a 123° C e 1,5 atm. de pressão. Uma alíquota do material digerido foi misturado com 2 mL de molibdato de amônio 1:5 [(NH₄)₆Mo₇O₂₄.4 H₂O:água destilada] para a formação do complexo ácido sílico-molíbídico [H₄(SiMo₁₂O₄₀)]. A formação do complexo ácido sílico-molíbídico é máxima entre pH 1,0 e 2,0. Para baixar o pH das amostras, quantidades proporcionais ao volume da alíquota foram adicionadas de HCl (50%). O ácido 1-amino-2-naftol-4-sulfônico (reductor), utilizado para eliminar a interferência do P e do Fe, foi substituído pelo ácido oxálico (75 g de (COOH)₂. 2H₂O em 200 mL de água destilada) na proporção de 2 mL por amostra. A leitura do Si nos extratos foi feita em fotocolorímetro (Alfakit /modelo AFK-0526), no comprimento de onda de 410 nm.

A matéria seca da parte aérea (MSPA), composta de folhas+caules coletada 120 dias após o transplantio (DAT), foi inicialmente, seca em estufa de ventilação forçada a 70 °C, até se atingir massa constante. A parte aérea + caule foi processada em conjunto. Foram avaliadas as alturas das plantas (m), com auxílio de uma trena, medindo-se a distância entre a base do colo da planta até a extremidade da haste principal, a produção, que foi determinada ao longo do estágio reprodutivo das plantas, e também o diâmetro, o comprimento, a massa e o diâmetro dos frutos comerciais.

Para as determinações da fotossíntese líquida, condutância estomática, concentração intercelular de CO₂, transpiração, eficiência do uso da água e eficiência instantânea de carboxilação foi utilizado o aparelho IRGA modelo LI-6400XT (Li-Cor, Lincoln, Nebraska, USA). Foram escolhidas aleatoriamente duas plantas, definindo-se como unidade amostral a sexta folha de cima para baixo, totalmente expandidas e maduras. Por se tratar de uma espécie com folhas compostas, foram utilizados os três primeiros folíolos de cada folha para se efetuar a mensuração, totalizando seis medidas. Foi fixado o valor de 850 μmol m⁻² s⁻¹ de irradiância de saturação, valor definido através da realização de uma curva de luz, optando-se por utilizar o valor de radiação que induziu a fotossíntese máxima. A temperatura da câmara do IRGA foi controlada a 28° C, já que nas plantas C3 a taxa máxima de fotossíntese é atingida em intensidade de radiação relativamente baixa, não ocasionando destruição ou danos ao aparato fotossintético. As medições foram realizadas em uma área de folha de 6 cm².

A eficiência do uso da água (EUA) foi quantificada considerando a relação entre a taxa de assimilação de CO₂ e a taxa de transpiração do pimentão (Bänzinger et al., 2006),

utilizando o medidor portátil do analisador de gás infravermelho (IRGA / modelo - LI-6400). O índice total de estresse (ITE) foi calculado usando o método proposto por Fischer e Maurer (1978) e adaptado para o estresse salino: $ITE = (1-PE / PC) / D$. Onde PE = rendimento da produção de frutos submetida à deficiência de água (estresse) e PC = rendimento da produção sob condições normais (controle) e $D = 100\%$.

O cálculo da translocação do Si foi realizado utilizando o seguinte cálculo: $NT = (NC / TNP) * 100$. Onde: NT = translocação de nutrientes, NC = massa nutriente (MIC ou MAC) e nutriente total na planta (NTP). Os resultados foram expressos em percentual.

Os resultados encontrados nas diferentes avaliações foram submetidos à análise de variância. Para avaliação das médias foi aplicado o teste Tukey (5% de probabilidade) de acordo com as teorias preconizadas por Steel *et al.* (2006). Os desvios padrões foram calculados e aplicados os estimadores de correlação (Pearson), usando o software SISVAR (Ferreira, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na Figura 2 um aumento de 9,3 vezes na CE quando se compara o controle ($0,6 \text{ dSm}^{-1}$) com a situação de estresse salino ($5,6 \text{ dS}^{-1}$), esse aumento ocorreu devido ao alto teor de K_2O utilizado ($700 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$). Segundo Dias *et al.* (2019), adubações elevadas podem causar salinidade no solo, elevando o valor da CE acima de $3,5 \text{ dSm}^{-1}$, o que reduz o teor de matéria seca das raízes, caules, folhas e frutos. O aumento da salinidade no solo dificulta a absorção de água e de nutrientes, o que ocasiona a redução na disponibilidade de íons essenciais devido aos efeitos antagônicos do K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Cl^- (Hajiaghahi-Kamrani & Hosseinniya, 2013), o que reduz a produção na cultura do pimentão (Lima *et al.*, 2018). As fontes de corretivos não afetaram ($P > 0,05$) o valor da CE no controle e na condição de estresse salino.

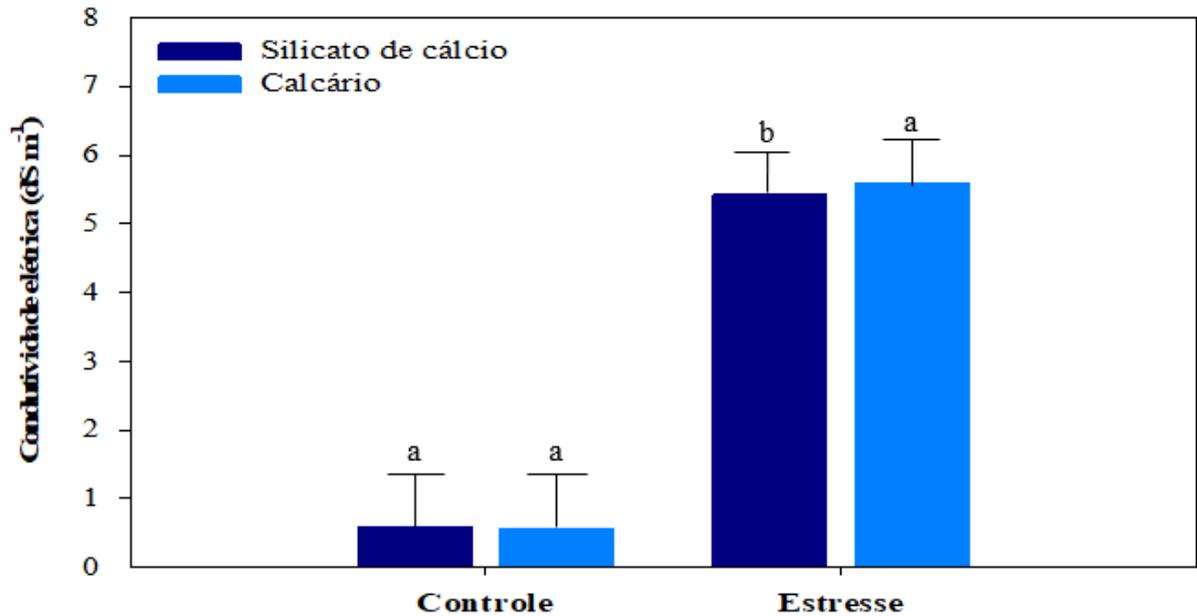


Figura 2. Condutividade elétrica do solo em função das taxas de K_2O e fontes de corretivos. Médias seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($P > 0,05$).

A translocação do Si na planta foi 100% maior ($P > 0,05$) no tratamento onde a planta estava sob estresse hídrico (8%) quando comparada ao tratamento controle (4%), em relação ao de silicato de cálcio (Figura 3). Esse resultado pode estar relacionado à alta mobilidade do Si; Marafon & Endres (2013) relatam que a alta mobilidade do Si promove a sua deposição na forma de sílica amorfa, nos tecidos da planta.

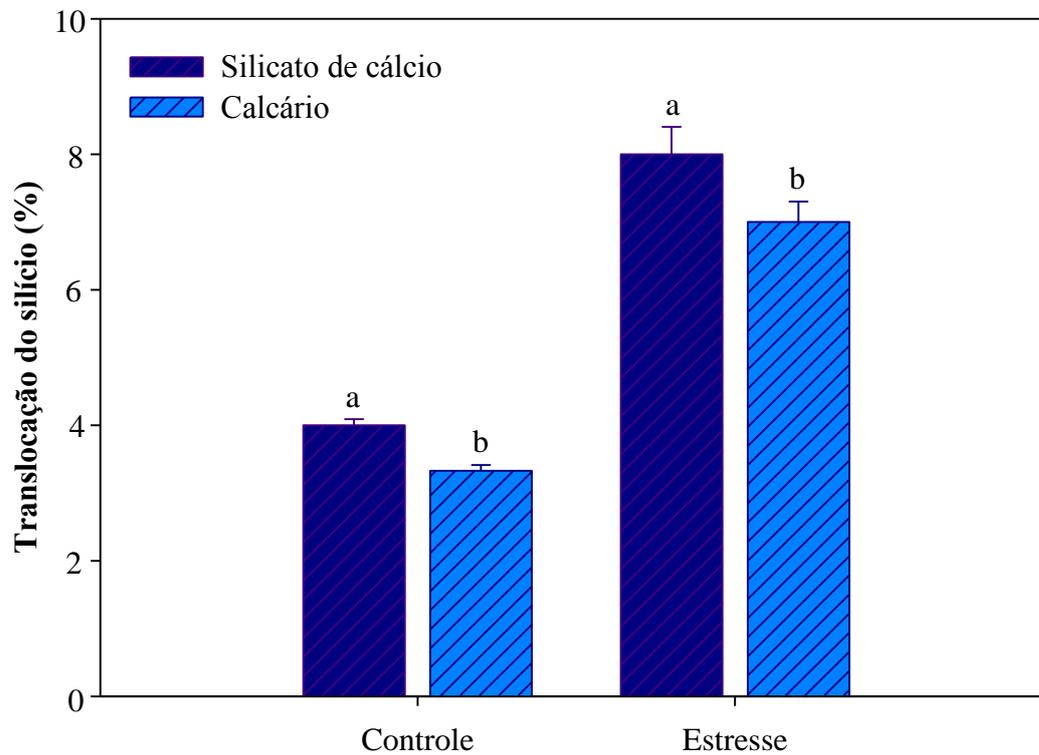


Figura 3. Translocação de Si (%) na planta em função das taxas de K_2O e fontes de corretivos. Médias seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($P > 0,05$).

A eficiência no uso da água (Figura 4A) e a eficiência instantânea de carboxilação (Figura 4B) apresentaram maiores valores nos tratamentos que receberam Si. O aumento da eficiência instantânea da carboxilação está relacionado ao aumento da concentração de gás carbônico e à taxa de assimilação do mesmo (Machado *et al.*, 2005; Dias *et al.*, 2019) que foi favorecida pela assimilação de Si.

Silva *et al.* (2015), destacam que, quanto menor for a disponibilidade de água, menor será o grau de abertura dos estômatos, o que conseqüentemente irá reduzir a perda de água. Este fechamento do estômato é determinado através da formação de cadeias pesadas de ácido polissilícico, ocorrendo polimerização, o que ocasiona a redução da transpiração e a conseqüente perda de água pela planta (Taiz *et al.*, 2015). De acordo com Fahad *et al.* (2015), em condições de estresse salino observa-se a diminuição do teor de água na folha, o que por conseqüência irá expor a planta a uma situação de estresse osmótico. Estudos destacam que a

presença do Si aumenta o teor de água relativo nas plantas sob condições de estresse salino, sendo possível observar a redução no efeito da toxicidade dos sais para a planta, em razão de um maior crescimento, além de aumento na espessura da folha e redução da transpiração e perda de água (Keller *et al.*, 2015).

O aumento da eficiência instantânea da carboxilação está relacionado ao aumento da concentração de gás carbônico e à taxa de assimilação do mesmo (Machado *et al.*, 2005; Dias *et al.*, 2019), que foi favorecida pela assimilação de Si.

Em condições de estresse salino também ocorre redução na eficiência instantânea da carboxilação, entretanto é visível a atenuação deste efeito na presença do silicato de cálcio quando comparado ao uso de calcário. O aumento da eficiência instantânea da carboxilação está relacionado ao aumento da concentração de gás carbônico e à taxa de assimilação do mesmo (Machado *et al.*, 2005; Dias *et al.*, 2019). A condição de salinidade, em razão da elevação do teor de K no solo, pode induzir o desequilíbrio nutricional das plantas (Hagin & Tucker, 1982) e esses distúrbios nutricionais reduzem de forma significativa a produção das culturas (Grattans & Grieve, 1993).

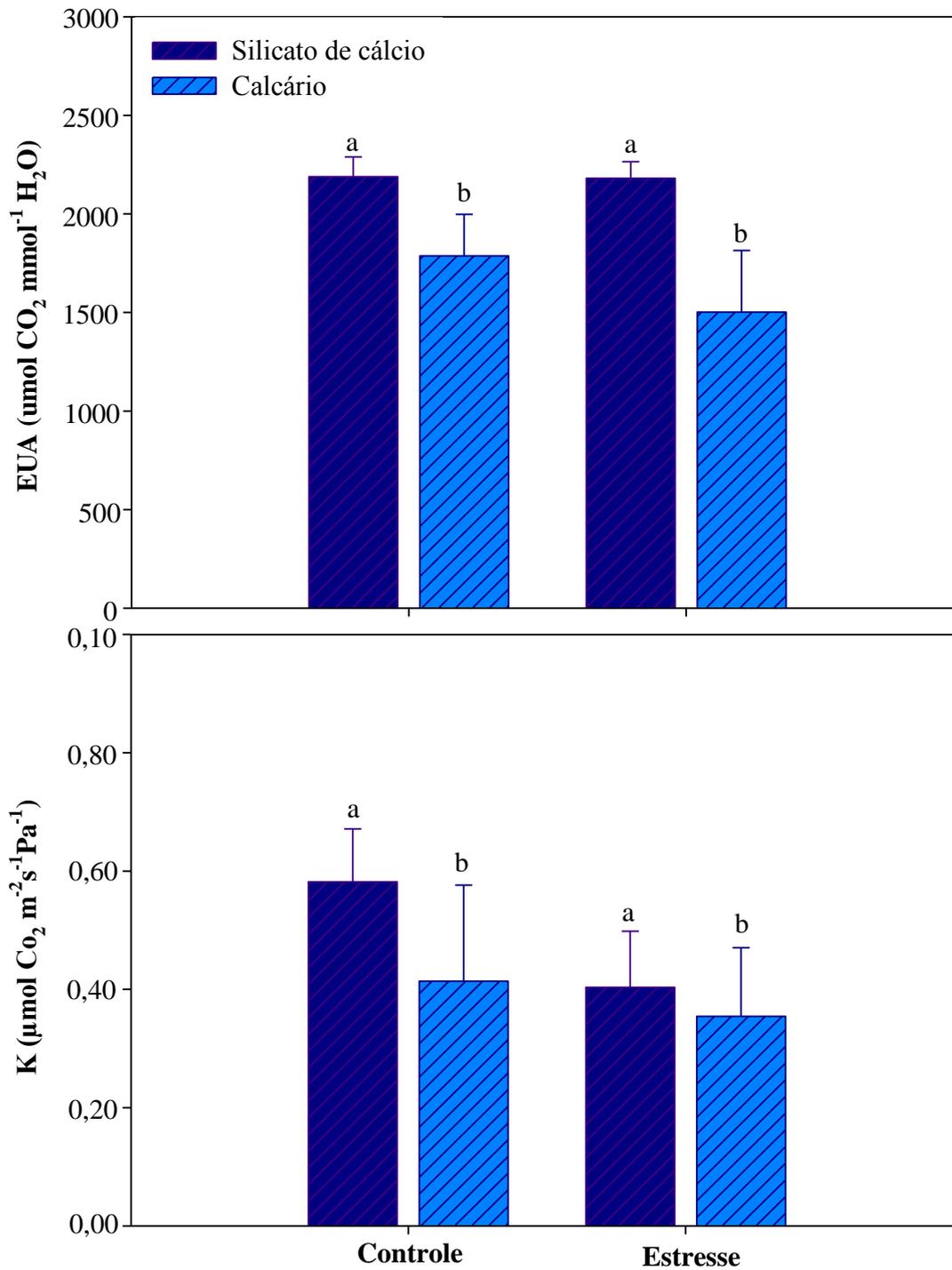


Figura 4. Eficiência do uso da água (A) e eficiência instantânea da carboxilação (B) em função das taxas de K_2O e fontes de corretivos (silicato de cálcio e calcário dolomítico). Médias seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($P > 0,05$).

O tratamento com Si resultou em índice de estresse de 10,4%, uma redução de 2,9% em comparação ao tratamento com calcário (13,3%) (Figura 5), o que confirma que a aplicação de silicatos no solo reduz os efeitos danosos que o estresse salino provoca nas plantas. Segundo Rezende et al. (2018), estudos relacionados aos efeitos do Si demonstram que o uso de silicato de cálcio reduz os efeitos da salinidade do solo, proporciona redução na CE, melhora a taxa fotossintética, a transpiração, a eficiência no uso da água e a produção (Rezende *et al.*, 2018).

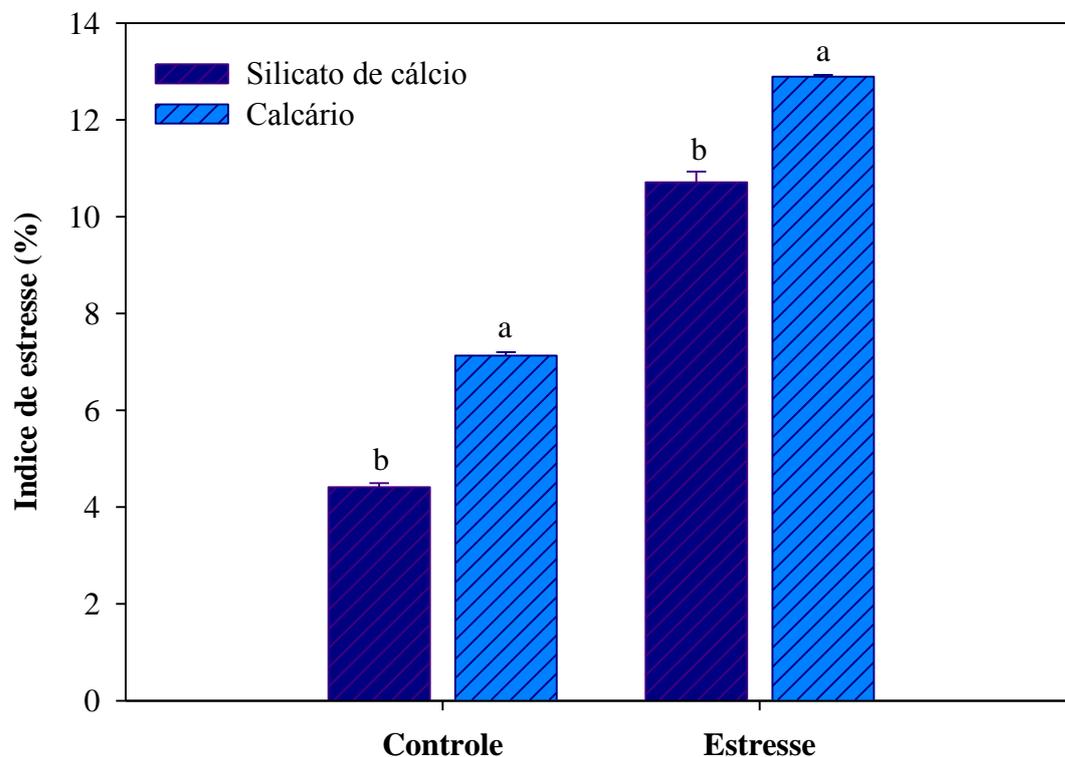


Figura 5. Índice de estresse (%) em função das taxas de K_2O e fontes de corretivos. Médias seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($P > 0,05$).

CONCLUSÃO

Em condições de estresse salino no solo, o uso do silicato de cálcio proporciona maior translocação de Si na planta, aumenta a eficiência no uso da água e a eficiência instantânea da carboxilação, reduzindo o índice de estresse.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG / Brasil), pelo financiamento deste projeto e a concessão de bolsa de doutorado, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq / Brasil), pela produtividade do orientador.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, JA.; RODELLA, AA. 2003. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N.; MARQUES, JJ; GUILHERME, LRG; LIMA, JM; LOPES, AS; ALVAREZ VVH. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.291-334.
- BÄNZIGER, M; EDMEADES, GO; LAFITTE, HR. 2002. Physiological mechanisms contributing to the increased N stress tolerance of tropical maize selected for drought tolerance. *Field Crops Research* 75: 223-233.
- CASTELLANOS, CIS; ROSA, MP; DEUNER, C; BOHN, A; BARROS, ACSA; MENEGHELLO, GE. 2016. Aplicação ao solo de cinza de casca de arroz como fonte de silício: efeito na qualidade de sementes de trigo produzidas sob stresse salino. *Revista de Ciências Agrárias* 39: 95-104.
- CASTRO, GSA; CRUSCIOL, CAC. 2013. Effects of superücialliming and silicate application on soil fertility and cropyield under rotation. *Geoderma* 195/196:234-242.
- DEXTER, AR. 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects ofsoil texture, density, and organic matter, and effects onroot growth. *Geoderma* 120:201-214.
- DIAS, MS; MARQUES, DJ; BIANCHINI, HC. 2019. Fertilization with silicon in sweet pepper improved plants grown under salt stress. *American Journal of Experimental Agriculture* 40: 1-12
- ELLIOTT, CL; SNYDER, GH. 1991. Autoclave - induced digestionfor the colorimetric determination of silicon in rice straw.*J. Agric. Food. Chem* 39:1118-1119.
- FAHAD, S; HUSSAIN, S; MATLOOB, A; KHAN, FA; KHALIQ, A; SAUD, S; HASSAN, S; SHAN, D; KHAN, F; ULLAH, N. 2015. Phytohormones and plant responses to salinity stress: a review. *Plant Growth Regul* 75: 391–404.

- FERREIRA, D. 2011. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia* 35: 1039-1042.
- FISCHER, RA; MAURER, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars 1: Grain yield responses in spring wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* 29:892–912.
- GENUCHTEN, MT van. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
- GRATTANS, SR; GRIEVE, CM. 1993. Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments. In: Pessaraki, M. (Ed). *Plant and Crop Stress*. 1: 203-226.
- HAGIN, J; TUCKER, B. 1982 Fertilization of dryland and irrigated soils. *Advanced Series in Agricultural Sciences* 12: 188-198.
- HAIAGHAEI-KAMRANI M; HOSSEINNIYA, H. 2013. Effect of salinity on nutrient uptake in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in hydroponic system. *International Journal of Agronomy and Plant Production* 4: 2729-2733.
- HUSSEIN, MM; EL-FAHAM, SY; ALVA, AK. 2012. Pepper plants growth, yield, photosynthetic pigments, and total phenols as affected by foliar application of potassium under different salinity irrigation water. *Agricultural Sciences* 3: 241-248.
- KELLER, C; RIZWAN, M; DAVIDIAN, JC; POKROVSKY, OS; BOVET, N; CHAURAND, P; MEUNIER, JD. 2015. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 μ M Cu. *Planta* 241: 847–860.
- KILMER, VJ. 1965. Silicon. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, *American Society of Agronomy* 959-962. (Monograph 9).

LIMA, NS; SILVA, EFF; MENEZES, D; CAMARA, TR; WILLADINO, LG. 2018. Fruit yield and nutritional characteristics of sweet pepper grown under salt stress in hydroponic system. *Revista Caatinga* 31: 297-305.

MACHADO, EC; SCHMIDT, PT; MEDINA, CL; RIBEIRO, RV. 2005. Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 40: 1161-1170.

MARQUES, DJ; FERREIRA, MM; LOBATO AKS; CARVALHO, JG; CARVALHO, JA, FREITAS, WA; BASTOS, ARR; PEREIRA, FJ; CASTRO, EM. 2014. CaSiO_3 improves water potential and gas exchange but not contribute to the production parameters of maize plants exposed to different irrigation depths. *Australian Journal of Crop Science* 8: 1257-1265.

MARAFON, AC; ENDRES, L. 2013. Silicon: fertilization and nutrition in higher plants. *Revista Ciências Agrárias* 56: 380 – 388.

MENEGALE, M .; CASTRO, G.; MANCUSO, M. 2015. Silício: interação com o sistema solo-planta. *Journal of Agronomic Sciences* 4 : 435-454.

NOVAIS, RF; et al. 1991. *Métodos de pesquisa em fertilidade do solo: ensaio em ambiente controlado*. Brasília, BR: EMBRAPA-SEA. 392p.

OLIVEIRA, FA; DUARTE, SN; MEDEIROS, JF; DIAS, NS; SILVA, RCP; LIMA, CJGS. 2013. Manejos da fertirrigação e doses de N e K no cultivo de pimentão em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17: 1152-1159.

OLIVEIRA, FA; DUARTE, SN; MEDEIROS, JF; DIAS, NS; OLIVEIRA, MKT; SILVA, RCP; LIMA, KS. 2015. Nutrição mineral do pimentão submetido a diferentes manejos de fertirrigação. *Horticultura Brasileira* 33: 216-223.

PINHEIRO, FWA; LIMA, GS; GHEYI, H; DIAS, AS; MOREIRA, RCL; NOBRE, RG; SOARES, LAA. 2019. Saline water and potassium fertilization in cultivation of grafted west indian cherry 'brs 366 jaburu'. *Bioscience Journal* 35: 187-198.

REICHARDT, K; TIMML, C. 2012. *Solo, Planta e Atmosfera*. Barueri, BR: Manole. 500p.

RICHARDS, LA. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington, US: USDA Agricultural Handbook. 160 p.

REZENDE, R.; RODRIGUES, FA; SOARES, JDR; SILVEIRA, HRO; PASQUAL, M; DIAS, GMG. 2018. Salt stress and exogenous silicon influence physiological and anatomical features of in vitro-grown cape gooseberry. *Ciência Rural* 48: 1-9.

SANTOS, HG; JACOMINE, PKT; ANJOS, LHC; OLIVEIRA, VA; OLIVEIRA, JB; COELHO, MR; LUMBRERAS, JF; CUNHA, TJF. 2006. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro, BR: Embrapa Solos. 306p.

SANTOS, ES; SILVA, EFF; MONTENEGRO, AAA; SOUZA, ES; SOUZA, RMS; SILVA, JRI. 2018. Produtividade do pimentão sob diferentes lâminas de irrigação e doses de potássio em região semiárida. *Irriga* 23: 518-534.

SILVA, FG; DUTRA, WF; DUTRA, AF; OLIVEIRA, IM; FILGUEIRAS, LMB; MELO, AS. 2015. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 19: 946-952.

SNYDER, GH. 1991. Development of a silicon soil test for Histosol-grown rice. Belle Glade Florida, USA, 2: 29-39

STEEL, RGD; TORRIE, JH; DICKEY, DA. 2006. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. Moorpark: Academic Internet Publishers. New York, US: 666p.

TAIZ, L; ZEIG, E; MØLLER, IM; Murphy, A. 2015. *Plant physiology and development*. Oxford: Sinauer Associates. Massachusetts, US: 761p.

TEHSEEN, S; AYYUB, CM; AMJAD, M; AMJAD, R. 2016. Assessment of salinity tolerance in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes on the basis of germination, emergence and growth attributes. *Pakistan Journal of Botany* 48: 1783-1791.