

**APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO NA ATENUAÇÃO DE DANOS DE  
DEFICIÊNCIA HÍDRICA EM CULTIVARES DE FEIJÃO-CAUPI**

**DUVAL CHAGAS DA SILVA**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**JULHO DE 2018**

**APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO NA ATENUAÇÃO DE DANOS DE  
DEFICIÊNCIA HÍDRICA EM CULTIVARES DE FEIJÃO-CAUPI**

**DUVAL CHAGAS DA SILVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba / Embrapa Algodão, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias / Área de Concentração: Agrobioenergia e Agricultura Familiar.

**Orientador: Prof. Dr. Alberto Soares de Melo**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**JULHO DE 2018**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586a Silva, Duval Chagas da.  
Aplicação foliar de silício na atenuação de danos de deficiência hídrica em cultivares de feijão-caupi [manuscrito] : / Duval Chagas da Silva. - 2018.  
60 p. : il. colorido.

Digitado.  
Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Estadual da Paraíba, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, 2018.  
"Orientação : Prof. Dr. Alberto Soares de Melo , Departamento de Biologia - CCBS."

1. Irrigação agrícola. 2. *Vigna unguiculata* (L.) Walp. 3. Enzimas antioxidantes. 4. Cultivo de feijão. I. Título

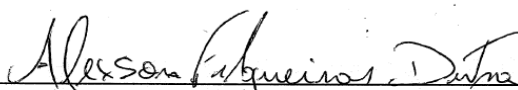
21. ed. CDD 635.652

**APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO NA ATENUAÇÃO DE DANOS DE  
DEFICIÊNCIA HÍDRICA EM CULTIVARES DE FEIJÃO-CAUPI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba / Embrapa Algodão, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias / Área de Concentração: Agrobioenergia e Agricultura Familiar.

**Aprovada em 09 de julho de 2018**

**Banca Examinadora:**



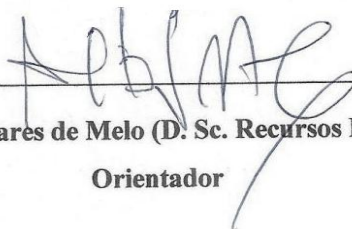
---

Prof. Dr. Aléxson Filgueiras Dutra (D.Sc. Agronomia) – IMESB  
Examinador



---

Prof. Dr. Yuri Lima Melo (D.Sc. Fitotecnia) - UEPB  
Examinador



---

Prof. Dr. Alberto Soares de Melo (D. Sc. Recursos Naturais)-UEPB  
Orientador

Aos meus pais, por todo amor e carinho.

Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Ana e José, por toda a educação e apoio para prosseguir em meu trabalho.

À todos da minha família, por sempre acreditar em meu sonho.

Aos meus amigos e companheiros do ECOLAB, Yuri, Wellerson, Venâncio, Igor, Anderson, Auta paulina, por todo o apoio e esforço no trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alberto Soares de Melo, por todos os ensinamentos.

À Embrapa Meio-Norte pela concessão das sementes utilizadas nesta pesquisa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de mestrado.

A todos que constituem a Universidade Estadual da Paraíba, por disponibilizar a infraestrutura e o apoio necessário durante o curso de graduação e mestrado.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Objetivo Geral.....	16
1.2. Específicos.....	17
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1. Cultura do feijão-caupi.....	18
2.2. A deficiência hídrica.....	19
2.3. Silício.....	20
3. MATERIAL E MÉTODO.....	23
3.1. Localização da área experimental e dados climáticos.....	23
3.2. Delineamento experimental e fatores em estudo.....	24
3.3. Instalação e condução do experimento.....	26
3.4. Fonte de Silício.....	29
3.5. Variáveis analisadas.....	29
3.5.1. Biometria.....	29
3.5.2. Variáveis fisiológicas.....	30
3.5.3. Atividade das enzimas antioxidants.....	31
3.5.4. Quantificação de prolina livre.....	32
3.5.5. Análises estatísticas.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1. Variáveis de crescimento.....	34
4.2. Variável fisiológica.....	41
4.3. Atividade das enzimas antioxidantes.....	43
4.4. Teor de prolina livre.....	47
5. CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS.....	50
APÊNDICES.....	60

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Principais características dos cultivares utilizados no experimento. Campina Grande, PB, 2018.....26
- Tabela 2.** Características físico-químicas do solo utilizado para o preenchimento dos vasos. Campina Grande, PB, 2018.....27
- Tabela 2.** Resumo das análises de variância para as variáveis: Altura; TCA- taxa de crescimento absoluta; TEA- taxa de expansão absoluta; AFO- área foliar; MFT- massa fresca total da parte aérea;  $\Psi_w$ - potencial hídrico foliar SOD- superóxido dismutase; APX – ascorbato peroxidase; PRL- prolina;. Campina Grande, PB,2018.....59



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização da área experimental. Campina Grande, PB, 2018.....23
- Figura 2.** Variáveis climáticas, temperatura, precipitação e evaporação verificadas durante o período de condução do experimento. Campina Grande, PB, 2018.....24
- Figura 3.** Cultivares de feijoeiro utilizadas na pesquisa, BRS Guariba (A), BRS Itaim (B), BRS Aracé (C), BRS Rouxinol (D). Campina Grande, PB, 2018.....25
- Figura 4.** Disposição dos vasos e espaçamento utilizado para o arranjo dos vasos em blocos casualizados. Campina Grande, PB, 2018.....26
- Figura 5.** Passos da instalação do experimento, destaque para a seleção das sementes (A), aplicação do fungicida (B) e covas para semeadura (C). Campina Grande, PB, 2018.....28
- Figura 6.** Aferição de dados de crescimento, altura de planta e diâmetro caulinar. Campina Grande, PB, 2018.....30
- Figura 7.** Altura de planta dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018.....35
- Figura 8.** Taxa de crescimento absoluta (TCA) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas

diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018.....36

**Figura 9.** Taxa de expansão absoluta (TEA) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018.....38

**Figura 10.** Área foliar total (AFO) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018.....40

**Figura 11.** Massa fresca total (MFT) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018.....41

**Figura 12.** Potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018.....43

**Figura 13.** Atividade da enzima Superóxido dismutase (SOD) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018.....45

**Figura 14.** Atividade enzima Ascorbato peroxidase (APX) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup> ). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018.....47

**Figura 15.** Teor de prolina livre (PRL) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup> ). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018.....48

## LISTA DE ABREVIATURAS

AFO- Área foliar total

APX-Ascorbato peroxidase

CAT-Catalase

CO<sub>2</sub>-Gás carbônico

GEN-Genótipo

DAE- Dias após emergência

EDTA- ácido etilodiaminotetracético

EROs- Espécies reativas de oxigênio

E0-Sem déficit hídrico (100% de disponibilidade de água)

E1-Com restrição hídrica (50% de disponibilidade de água)

g- grama

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Peróxido de hidrogênio

H<sub>2</sub>O-Água

MFT- Massa fresca total da parte aérea

mg- miligrama

NBT- Cloreto de nitrotetrazólio azul

O<sup>2</sup>-Gás oxigênio

<sup>1</sup>O<sub>2</sub>-Oxigênio singlete

OH<sup>\*</sup>-Radical hidroxila

O<sub>2</sub><sup>\*</sup> - -ânion superóxido

PRL- Prolina

PVP- Polivinilpirrolidona

rpm- Rotação por minuto

Si- Silício

SOD- Superóxido dismutase

TEA – taxa de expansão absoluta

TCA- taxa de crescimento absoluta

$\Psi_w$ - Potencial hídrico foliar

## RESUMO

SILVA, D.C. Aplicação foliar de silício na atenuação de danos de deficiência hídrica em cultivares de feijão-caupi. Campina Grande, PB, 2018, 60p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias). Área de concentração: Agrobioenergia e Agricultura Familiar. Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

A água é um dos principais fatores limitantes para o crescimento e desenvolvimento das culturas, podendo comprometer o rendimento das plantas, notadamente no feijão-caupi, justificando-se o uso da irrigação. Todavia, quando cultivado na região semiárida, caracterizada pela limitação hídrica, deve-se atentar para o uso eficiente da água, o que pode ser obtido com uso de genótipos mais tolerantes à restrição de água. O estresse por déficit hídrico na planta pode ser mitigado por meio da aplicação de eliciadores endógenos como o silício. Os efeitos benéficos do Si podem ser divididos em dois grupos: físicos e fisiológicos. Os benefícios físicos estão relacionados ao acúmulo do Si na parede celular das plantas, formando uma barreira física à redução da perda de água e os fisiológicos estão relacionados com potencializar a atividades de enzimas como peroxidases e aumentar produção de moléculas como a prolina. A pesquisa foi executada, no ano de 2017, no município de Campina Grande - PB: com delineamento experimental de blocos casualizados usando o esquema fatorial 4x2x3 com 5 repetições. Os fatores avaliados foram constituídos por quatro genótipos de feijão-caupi, duas lâminas de irrigação (50 e 100 % da evapotranspiração de referência - ETo) e três doses de silício (0, 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>) via aplicação foliar, na forma de silicato de potássio. Foram realizadas avaliações fisiológicas (potencial hídrico foliar na antemanhã), de crescimento (altura de planta, taxa de crescimento absoluta, expansão caulinar e área foliar), bioquímicas (teor de prolina e enzimas antioxidantes). O trabalho teve

como objetivo avaliar o silício como atenuador de estresse por deficiência hídrica em cultivares de feijão-caupi. Portanto, o silício proporcionou atenuação do déficit hídrico com aumento no crescimento e no desenvolvimento dos cultivares de feijão-caupi. As enzimas antioxidantes superóxido dismutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX) foram potencializadas com a aplicação foliar de silício, aumentando a tolerância das cultivares ao déficit hídrico. Os cultivares BRS Guariba e BRS Aracé expressaram aumento no teor de prolina, sob déficit hídrico e suplementados com Si, o que promoveu maior osmoproteção as plantas.

**Palavras-chave:** *Vigna unguiculata* (L.) Walp, silício, enzimas antioxidantes.

## ABSTRACT

SILVA, D.C. Foliar application of silicon in the attenuation of water deficiency damages in cowpea cultivars. Campina Grande, PB, 2018, 60p. Dissertation (Post-Graduate Program in Agrarian Sciences). Area of concentration: Agrobioenegia and Family Agriculture. State University of Paraíba - UEPB.

Water is one of the main limiting factors for the growth and development of crops, which can compromise the yield of plants, especially in cowpea, justifying the use of irrigation. However, when cultivated in the semi-arid region, characterized by water limitation, attention should be paid to the efficient use of water, which can be obtained by using more tolerant genotypes to water restriction. Stress due to water deficit in the plant can be mitigated through the application of endogenous elicitors such as silicon. The beneficial effects of Si can be divided into two groups: physical and physiological. The physical benefits are related to the accumulation of Si in the cell wall of plants, forming a physical barrier to the reduction of water loss and physiological are related to potentiate the activities of enzymes such as peroxidases and increase production of molecules such as proline. The research was carried out, in the year 2017, in the city of Campina Grande - PB: with a randomized complete block design using the 4x2x3 factorial scheme with 5 replications. The evaluated factors were constituted by four cowpea genotypes, two irrigation slides (50 and 100% of the reference evapotranspiration - ETo) and three silicon doses (0, 100 and 200 mg L<sup>-1</sup>) via leaf application, in the form of potassium silicate. Plant physiological evaluations (leaf water potential in the morning), growth (plant height, absolute growth rate, shoot growth and leaf area), biochemical (proline content and antioxidant enzymes) were performed. The objective of this study was to evaluate silicon as a stress attenuator due to



water deficiency in cowpea cultivars. Therefore, silicon provided attenuation of water deficit with increased growth and development of cowpea cultivars. The antioxidant enzymes superoxide dismutase (SOD) and ascorbate peroxidase (APX) were potentiated with foliar application of silicon, increasing tolerance of the cultivars to the water deficit. The cultivars BRS Guariba and BRS Aracé expressed an increase in the content of proline, under water deficit and supplemented with Si, which promoted greater osmoprotection of the plants.

**Key words:** *Vigna unguiculata* (L.) Walp, silicon, antioxidant enzymes.

## 1. INTRODUÇÃO

Considerado um alimento de alto valor nutritivo e elevada importância comercial, principalmente para a região Nordeste do Brasil, o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é cultivado predominantemente em regiões semiáridas (AGBICODE et al., 2009), nas quais são recorrentes as situações de deficiência hídrica (HALL et al., 2003; MUCHERO et al., 2009). Fato que impossibilita a cultura de atingir seu máximo potencial produtivo, de tal forma que a produtividade média dessa leguminosa é considerada baixa (401 kg ha<sup>-1</sup>) (EMBRAPA, 2016).

Conforme levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018), na safra 2017/2018 a área total ocupada com o cultivo de feijão-caupi no Brasil ultrapassou 1527,1 mil hectares, tendo uma produção estimada em 796,7 mil toneladas. No entanto, a área plantada de feijão-caupi no estado da Paraíba é de apenas 82,2 mil hectares, devido à prolongada estiagem nas últimas safras, com produtividade média estimada em 234 kg ha<sup>-1</sup>.

As respostas das plantas às condições de déficit hídrico variam de acordo com a espécie, cultivar, tempo de exposição, fatores edáficos, entre outros (NASCIMENTO et al., 2011; CARVALHO et al., 2016); Em geral, a ocorrência do déficit hídrico induz uma variedade de respostas em formas de características morfofisiológicas e bioquímicas, a qual altera todo o processo fotossintético (CLAVEL et al., 2005).

É importante destacar que, além das respostas já mencionadas, o estresse hídrico provoca o estresse oxidativo, pois conduz a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO). Essas espécies atuam como mensageiros de vários processos celulares, incluindo a tolerância aos diferentes estresses ambientais, as quais dependem do equilíbrio entre sua produção e sua eliminação (SHARMA et al., 2012). Esses pesquisadores destacam que esse mecanismo pode atuar como molécula sinalizadora ou causar dano oxidativo aos vegetais.

Para reduzir a superprodução de EROs, as Plantas, as plantas possuem sistemas enzimáticos antioxidantes e não-antioxidantes capazes de minimizar os danos por estresse oxidativo e manter o estado redox da célula. O sistema de defesa enzimático compreende a atividade de enzimas antioxidantes, como a superóxido dismutase (SOD), a catalase (CAT) e a ascorbato peroxidase (APX); bem como a osmoproteção por solutos compatíveis e removedores de radicais livres como prolina e glicina betaína (YANG et al., 2009; SZABADOS e SAVOURE, 2010; LISAR et al., 2012).

Nesse sentido, a indução de melhorias na fisiologia e morfologia do feijão-caupi torna-se uma ferramenta importante para a viabilidade do cultivo em regiões com predominância de deficiência hídrica. Para tanto, além do manejo adequado da irrigação, o uso de algumas substâncias pode colaborar na eficiência no uso da água e na melhoria das rotas metabólicas, resultando em adaptação das plantas às mudanças ambientais (MCCUE et al., 2000; AGOSTINI et al., 2013; FERRAZ et al., 2014).

Vários estudos têm demonstrado o efeito positivo do Si em plantas sob estresse hídrico. No milho, por exemplo, a adição de Si aumentou a eficiência do uso da água, reduzindo a transpiração da folha e a taxa de fluxo de água no vaso do xilema (GAO et al., 2006). Hattori et al. (2008) sugeriram que o Si poderia facilitar a absorção e transporte de água em sorgo em condições de seca. Em experimentos com trigo, o Si aliviou o estresse oxidativo, regulando as atividades de enzimas antioxidantes, em condição de seca (GONG et al. 2005), e em soja elevou o conteúdo de água foliar, bem como a fotossíntese (SHEN et al., 2010), e em tomate beneficiou o status hídrico das plantas (SHI et al., 2016).

Assim, considerando-se a importância da produção do feijão-caupi na região semiárida da Paraíba e a necessidade de melhoria na eficiência no uso da água para os sistemas de produção, faz-se necessário intervir no sentido de identificar materiais melhorados aliando o potencial produtivo e a tolerância à seca, o que pode ser otimizado pelo uso adequado da água e de atenuadores.

## **1.1 Objetivo Geral**

Avaliar o silício como atenuador de estresse por deficiência hídrico em cultivares de feijão-caupi.

## 1.2 Específicos

Avaliar parâmetros de crescimento em genótipos de feijão-caupi sob restrição hídrica e tratados com silício.

Determinar a atividade bioquímica de antioxidantes e de osmólitos reguladores em genótipos de feijão-caupi sob restrição hídrica e tratados com silício.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Cultura do feijão-caupi**

O feijão-caupi é uma dicotiledônea pertencente à ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Faboideae, tribo Phaseoleae, subtribo Phaseolinae, gênero *Vigna*, espécie *Vigna unguiculata* (L.) (ONOFRE, 2008). Tem a sua origem no continente africano, sendo introduzido na América Latina na segunda metade do século XVI. No Brasil, foi introduzido primeiramente no estado da Bahia, disseminando-se pela região Nordeste e posteriormente para as demais regiões do país (FREIRE FILHO et al., 2011).

A partir da Bahia, o feijão-caupi foi disseminado por todo o País. No Brasil e grande parte da América Latina, o feijão é um dos alimentos básicos, com fundamental importância devido ao fato de ser fonte acessível de proteína, com elevado valor energético (PEREIRA et al., 2015).

A cultura gera renda para milhares de famílias das regiões Norte e Nordeste do Brasil no processo de produção e comercialização principalmente. Em função das suas características de adaptabilidade ampla, precocidade e capacidade de produzir em ambientes desfavoráveis, o feijão-caupi é uma cultura que tem grandes perspectivas, frente à escassez de alimento que há nos países em desenvolvimento, entre os quais se inclui o Brasil, em particular, a região Nordeste (SOUZA et al., 2013).

### **2.2 A deficiência hídrica**

O estresse severo por falta de água pode levar a uma quebra total da safra, especialmente em regiões semi-áridas, onde são comumente expostas a condições

intermitentes ou terminais de estresse hídrico (BIJU et al. 2017), pois além de afetar as relações hídricas e alterar o metabolismo das plantas, a limitação em sua disponibilidade é fenômeno que ocorre em grandes extensões de áreas cultiváveis (NOGUEIRA et al., 2001). No feijoeiro, devido ao curto período de seu ciclo, pequenos períodos de seca podem afetar severamente o crescimento. A cultura requer de 300 a 500 mm de água, dependendo do clima. Quando estas necessidades não são satisfeitas, o rendimento se reduz a um valor dependente da etapa fenológica em que o déficit de água acontece. Quando a seca se apresenta na etapa vegetativa, por exemplo, o efeito sobre é mínimo, enquanto que na etapa de pré-floração e enchimento de vagens, a plantas é muito sensível à falta de água no solo (CALVACHE e REICHARDT, 1996).

As respostas dos vegetais à seca são caracterizadas por mudanças fundamentais na relação da célula com a água, nos processos fisiológicos, na estrutura de membranas, além de mudanças morfológicas e bioquímicas (PIMENTEL, 2004). Todos os aspectos de crescimento e desenvolvimento das plantas são afetados pela deficiência hídrica nos tecidos, causada pela excessiva demanda evaporativa e/ou limitado suprimento de água. Como consequência da deficiência hídrica, verifica-se uma desidratação do protoplasto com consequente diminuição do volume celular e aumento na concentração de solutos. Aliado a isto, a diminuição da turgescência pode ser admitida como consequência do estresse hídrico, sendo o processo de crescimento, principalmente em extensão, o primeiro afetado (NOGUEIRA et al., 2005).

Estresse hídrico é conhecido por inibir a atividade fotossintética em tecidos devido ao desequilíbrio entre a captura e utilização de luz (FOYER e NOCTOR, 2000). A regulação da atividade do Fotossistema II resulta em um desequilíbrio entre a geração e utilização de elétrons, aparentemente resultando em alterações no rendimento quântico. Estas mudanças na fotoquímica dos cloroplastos de plantas sob seca é resultado da dissipação de energia da luz excedente no núcleo do PSII e antena, gerando espécies reativas de oxigênio (EROs) ( $O^{2-}$ ,  ${}^1O_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $OH$ ) que são potencialmente perigosos em condições de estresse de seca (PELTZER et al., 2002). Além disso, as alterações no transporte fotossintético de elétrons sob seca inevitavelmente levam à formação de radicais superóxido ( $O^{2-}$ ), uma vez que o oxigênio molecular compete com NADP para redução no lado acceptor do Fotossistema I. Os radicais hidróxidos produzidos iniciam reações próprias de propagação conduzindo à peroxidação dos lipídeos da membrana e destruição de proteínas (HALLIWELL, 1987).

As plantas possuem um sistema de defesa antioxidante sofisticado e altamente eficiente para controlar a produção de EROs (HUSSAIN et al., 2016). O mecanismo enzimático é formado principalmente pelas enzimas superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) (BIN et al., 2010; SILVA et al., 2012). Como também, a acumulação dos osmólitos (prolina) sob estresse hídrico está relacionado ao ajuste osmótico e em muitas plantas tem sido positivamente correlacionada com a tolerância ao estresse hídrico (BIJU et al., 2017). A prolina se acumula principalmente em folhas e é reconhecido como o soluto mais importante contra estresses abióticos (PEREZ-PEREZ et al., 2009; HUSSAIN et al., 2018).

Carvalho et al. (2000), avaliaram o efeito de diferentes níveis de déficit hídrico sobre a produção de feijão-caupi em casa de vegetação, os resultados alcançados mostraram que os rendimentos de grãos e de vagens foram reduzidos com o aumento do déficit hídrico, independentemente da etapa fenológica em que esse ocorreu. A queda de rendimento variou de acordo com a intensidade do déficit e com a etapa fenológica. Na etapa de crescimento, a queda de rendimento variou de 100% a 35%, para reposições de água de 20 e de 80%, respectivamente; na etapa de floração, houve queda da produção que variou de 81% a 34%, enquanto na etapa de frutificação a queda da produção variou de 73% a 32%, para reposições de água de 20 e de 80%, respectivamente.

### 2.3 Silício

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, com 27% de participação em massa, superado apenas pelo oxigênio. O silício não é encontrado na sua forma elementar na natureza por causa de sua alta afinidade pelo oxigênio. É encontrado somente em formas combinadas, como a sílica e minerais silicatados (SRIPANYAKORN et al., 2005). Está presente em minerais primários, como feldspato, augita, quartzo e mica, e em secundários, como a caulinita, montmorilonita, ilita e clorita (RAIJ, 1991).

Em solos tropicais, devido ao aumento da intemperização, o Si é encontrado basicamente na forma de opala e quartzo ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) sendo estas formas não disponíveis às plantas (BARBOSA FILHO et al., 2001). A solubilidade dos minerais silicatados no solo é

variável e influenciada por temperatura, pH, tamanho de partículas, composição química e pela absorção do Si nas superfícies de minerais (SAVANT et al., 1997). O uso do silício como fertilizante na agricultura ocorre em vários países, como Estados Unidos, Austrália, África do Sul e Japão, este último utiliza o Si no cultivo do arroz há pelo menos seis décadas (RODRIGUES et al., 2011).

As plantas absorvem o silício pelas raízes na forma de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ), que é transportado pelo xilema e posteriormente depositado como sílica amorfa ( $SiO_2 \cdot H_2O$ ) na parede celular, lúmen da célula e nos tricomas (MOHSENI E SABBAGH, 2014).

O silício, apesar de não ser considerado um elemento essencial às plantas, é um elemento benéfico com capacidade de reduzir o impacto de agentes estressores (SHI et al., 2013). Os conceitos de essencialidade estabelecidos por Arnon e Stout (1939) são, até hoje, utilizados pelos nutricionistas e fisiologistas: 1) a deficiência torna impossível para a planta completar o estágio vegetativo ou reprodutivo do seu ciclo de vida; 2) tal deficiência é específica para o elemento em questão, podendo ser corrigida ou impedida somente com o seu fornecimento; 3) o elemento está diretamente envolvido na nutrição da planta, sendo constituinte de um metabólito essencial ou exigido para a ação de um sistema enzimático, independentemente dos possíveis efeitos em corrigir alguma condição microbiológica ou química desfavorável do solo ou outro meio de cultura. Por estes critérios, a essencialidade para o silício foi demonstrada apenas para alguns grupos de plantas.

Os silicatos solúveis são fontes obtidas da fusão da sílica ( $SiO_2$ ) com hidróxidos ou carbonatos de sódio ou potássio em fornos pressurizados. Desse modo são obtidas as principais fontes de silicatos solúveis que são os silicatos de sódio e potássio. No entanto, a partir do Decreto-Lei no 4.945, que regulamenta a Lei no 6.894 de 16.01.1980, aprovada em 14.01.2004, apenas a comercialização e a utilização da fonte solúvel silicato de potássio na agricultura foram regulamentadas (REIS et al., 2007).

Um dos principais paradigmas da adubação de silício está no uso de fontes que possam aumentar a disponibilidade desse nutriente na rizosfera. As fontes tradicionalmente utilizadas, como os silicatos de cálcio e magnésio e, ou, as escórias de siderurgia, além de apresentarem baixíssimos teores de Si solúvel também são insolúveis ou apresentam baixa solubilidade em água. O uso de silício solúvel, na forma de silicato de potássio, tem proporcionado aumentos significativos de produção pelo aumento da eficiência no uso de nutrientes imóveis, como o cálcio, ferro, zinco, manganês e cobre, e conseqüentemente maior resistência ao ataque de pragas e doenças (RODRIGUES et al., 2007).



Desta forma, o fornecimento de Si via adubação foliar pode facilitar a absorção deste elemento na parte aérea das plantas, favorecendo assim o seu acúmulo na folha. O intuito de se pesquisar sobre o fornecimento foliar de Si é de descobrir alternativas viáveis de fertilização do nutriente, através da utilização de menores quantidades, que possam suprir as plantas de Si ou então estimular seus efeitos benéficos (BUCK et al, 2008).

Os efeitos benéficos do Si podem ser divididos em dois grupos: físicos e fisiológicos. Os benefícios físicos estão relacionados ao acúmulo do Si na parede celular das plantas, formando uma barreira física à redução da perda de água, melhorando a arquitetura das plantas (KORNDÖRFER et al., 2002). Segundo Ma e Yamaji (2006), a maioria dos efeitos benéficos do Si em reduzir o estresse hídrico é atribuída à deposição de Si na parede celular de raízes, folhas e caules. Os benefícios fisiológicos estão relacionados com aumento da atividade fotossintética, resistência ao ataque de fitopatógenos e pragas e da tolerância das plantas à seca, devido ao Si induzir uma série de reações metabólicas nas plantas resultando na formação de compostos como fitoalexinas, ligninas (POZZA et al., 2004), potencializar atividades de enzimas como peroxidases, polifenoloxidasas e quitinases (LIANG e SUN, 2005), aumentar a ação de defesas antioxidativas, reduzir o dano oxidativo de moléculas funcionais em membranas e aumentar a resistência estomática, no teor de peróxido de hidrogênio e prolina (GONG et al., 2005; GUNES et al., 2007; CRUSCIOL et al., 2009).

O uso do Si solúvel, na forma de silicato de potássio ( $K_2SiO_3$ ), tem gerado resultados satisfatórios quanto ao aumento na produção vegetal em soja, milho, batata, café e morango (RODRIGUES et al., 2007; MERRIGHI et al., 2007; LUZ et al., 2010) não apenas por diminuir a transpiração foliar, mas também por aumentar a eficiência no uso de nutrientes imóveis como o cálcio, ferro, zinco, manganês e cobre o que propicia, inclusive, maior resistência ao ataque de pragas e doenças (RODRIGUES et al., 2007). Esses resultados são bastantes promissores mesmo em culturas que não são acumuladoras desse elemento.

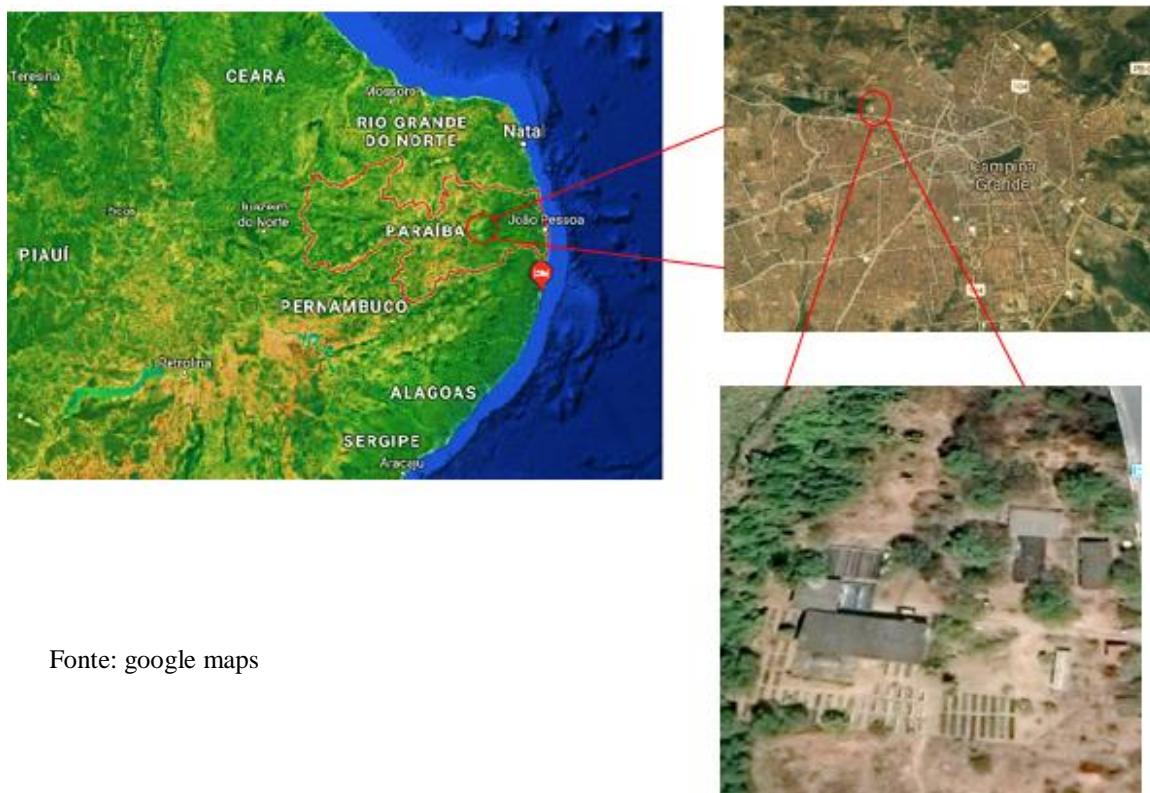
Há pesquisas que buscam elucidar os mecanismos fisiológicos mediados pelo silício na tolerância à deficiência hídrica. Gunes et al. (2008) verificaram que 6 dos 12 cultivares de girassol estudados apresentaram tolerância ao déficit hídrico. A tolerância à deficiência hídrica envolve menor dano a membrana; e em geral, em todas as cultivares aumentaram a condutância estomática e elevaram o teor de prolina na presença do Si.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Instalação do experimento

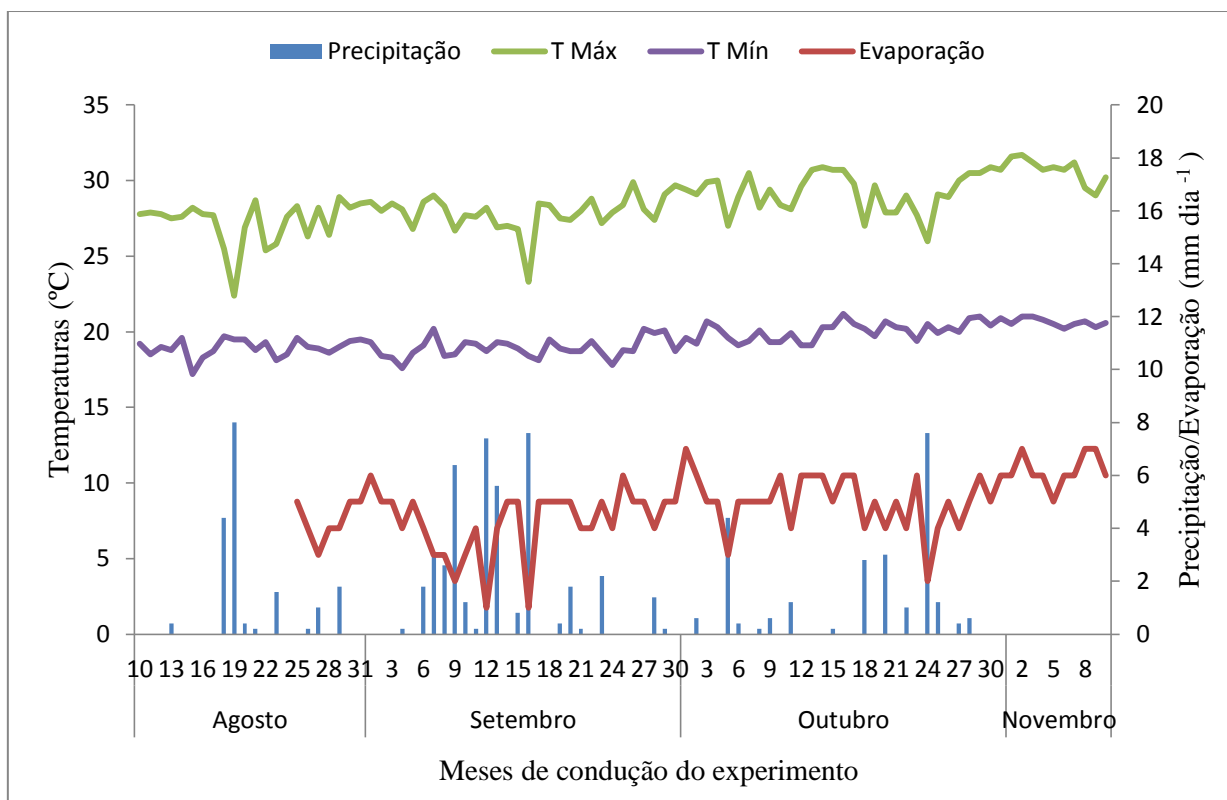
O trabalho foi realizado no Viveiro Florestal (Figura 1), situado a  $07^{\circ} 12' 42,99''$  de latitude Sul,  $35^{\circ} 54' 36,27''$  longitude Oeste a uma altitude de 521 metros, pertencente à Universidade Estadual da Paraíba, Campus I, Campina Grande – PB.

Diariamente as variáveis climáticas foram monitoradas por meio de coleta de dados na estação agrometeorológica automatizada, localizada Centro Nacional de Pesquisa de Algodão da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (CNPQ/EMBRAPA/Algodão). Foram coletadas as variáveis: precipitação pluviométrica (mm), temperaturas máxima ( $T_{\text{máx.}}^{\circ}\text{C}$ ), mínima ( $T_{\text{mín.}}^{\circ}\text{C}$ ) ambiental, (Figura 2).



Fonte: google maps

**Figura 1.** Localização da área experimental. Campina Grande, PB, 2018.



**Figura 2.** Variáveis climáticas, temperatura, precipitação e evaporação verificadas durante o período de condução do experimento. Campina Grande, PB, 2018.

### 3.2 Delineamento experimental e fatores em estudo

O experimento foi composto de 24 tratamentos organizados no delineamento de blocos ao acaso (DBC), no esquema fatorial 4x2x3, com cinco repetições e parcela experimental composta por seis plantas. Os fatores constituíram-se de quatro cultivares (BRS Guariba - G1; BRS Itaim - G2; BRS Aracé - G3; e BRS Rouxinol - G4 (Figura 3), duas lâminas de irrigação que corresponderam a 50% ETo (deficit hídrica) e 100% ETo (sem deficit hídrico), e três concentrações de silício (Si) (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>).

Os cultivares foram cedidos pela Embrapa Meio Norte e possuem características distintas (Tabela 1).



**Figura 3.** Cultivares de feijoeiro utilizadas na pesquisa, BRS Guariba (A), BRS Itaim (B), BRS Aracé (C), BRS Rouxinol (D). Campina Grande, PB,

**Tabela 1.** Principais características dos genótipos utilizados no experimento. Campina Grande, PB, 2018.

<b>Características</b>				
<b>Cultivares</b>	<b>Porte</b>	<b>Crescimento</b>	<b>Ciclo</b>	<b>NDF</b>
BRS Guariba	Semiereto	Indeterminado	65-70	42
BRS Itaim	Ereto	Determinado	60-65	40
BRS Aracé	Semiprostado	Indeterminado	70-75	41
BRS Rouxinol	Semiereto	Indeterminado	65-75	46

**OBS: NDF- número médio de dias para a floração; ciclo- dias**

### 3.3 Instalação e condução do experimento

O experimento foi conduzido em vasos com capacidade de 25 litros, sob condições de campo, no período de julho a novembro de 2017, sendo distribuídos em 10 linhas, cada linha com 12 vasos, totalizando 120 parcelas experimentais. Foi utilizado um espaçamento de 1 m entre linhas e 0,8 m entre vasos (Figura 4).



**Figura 4.** Disposição dos vasos e espaçamento utilizado para o arranjo dos vasos em blocos casualizados. Campina Grande, PB, 2018.

O solo utilizado no experimento foi analisado e as características físico-químicas estão dispostas na Tabela 2. Correção de salinidade foi realizada utilizando sulfato de cálcio.

**Tabela 2.** Características físico-químicas do solo utilizado para o preenchimento dos vasos. Campina Grande, PB, 2018.

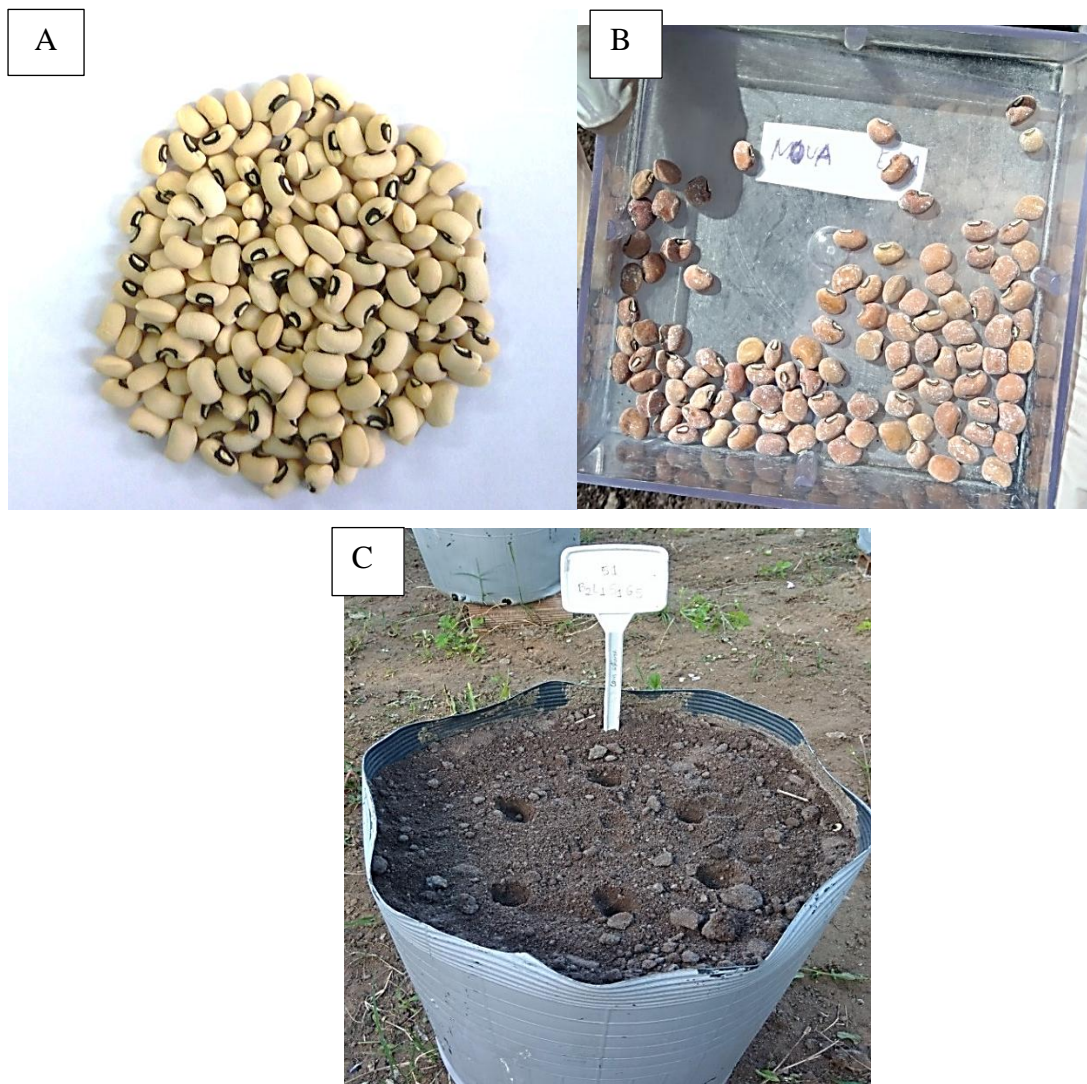
Características físicas		Características químicas	
<b>Granulometria (%)</b>		Cálcio (meq/100g de solo)	1,42
Areia	86,63	Magnésio (meq/100g de solo)	1,50
Silte	9,04	Sódio (meq/100g de solo)	0,84
Argila	4,33	Potássio (meq/100g de solo)	0,21
Classificação textural	Areia franca	S (meq/100g de solo)	3,97
Densidade do solo(g/cm <sup>3</sup> )	1,44	Hidrogênio (meq/100g de solo)	0,64
Densidade de partículas	2,72	Alumínio (meq/100g de solo)	0,00
Porosidade	47,06	T(meq/100g de solo)	4,61
Umidade	0,40	Carbonato de Cálcio Qualitativo	Ausência
		Carbono orgânico (%)	0,51
		Matéria orgânica (%)	0,88
		Nitrogênio	0,05
		Fósforo Assimilável mg/100g	1,35
		pH H <sub>2</sub> O (1:2, 5)	6,11
		Cond.elétrica–nmhos/cm	1,41
		(Suspensão Solo-Água)	
		Salinidade	Fortemente

Inicialmente foi realizada uma triagem das sementes com o objetivo de eliminar aquelas que continham danos físicos, biológicos e/ou má formação (figura 5A). Após a triagem, as sementes foram pesadas e transferidas para rolo giratório, construído de tubo de PVC, juntamente com fungicida (Captan®) na dosagem de 0,22 g 100 g<sup>-1</sup> de sementes, mantendo-o sob rotação durante 5 minutos e, em seguida, as sementes permaneceram em repouso por 24 horas (figura 5B).

Transcorridos 30 dias após a realização da correção, realizou-se a semeadura, adotando-se seis sementes por unidade experimental, a uma profundidade padrão de 0,03 m da superfície do solo (Figura 4C). Para padronização das parcelas experimentais foi realizado desbaste restando quatro plantas por vaso.

Aos 21 dias e 32 dias após a semeadura aplicou-se o adubo foliar com nutrientes necessários para a cultura, e aos 30 dias após o semeio realizou-se nova aplicação de MAP em cobertura. De acordo com as recomendações do fabricante, realizou-se a aplicação de inseticida (Mospilan) aos 17 dias e 33 dias após a semeadura, e fungicida (Folicur) aos 25 dias após a semeadura para manter a cultura livre de invasores, pragas e fungos.

A reposição hídrica foi realizado com base na evapotranspiração de referência utilizando evapotranspirador modelo EVAPOREMETER<sup>®</sup> JR-120, ao qual as leituras foram realizadas diariamente (Figura 2). O calculo era efetuado a partir da área do vaso, estágio fenológico e evaporação diária.



**Figura 5.** Passos da instalação do experimento, destaque para a seleção das sementes (A), aplicação do fungicida (B) e covas para semeadura (C). Campina Grande, PB, 2018

### 3.4 Fonte de Silício e aplicação

A fonte deste micronutriente utilizada foi o silício líquido comercial, com as seguintes características: Silício (Si)= 12%; Potássio (KO)= 15%; Índice salino= 26; Condutividade elétrica= 1,93 dS m<sup>-1</sup>; Densidade= 1,40 g L<sup>-1</sup>; pH= 10,96; Natureza física= Flúido. As concentrações de silício correspondentes a cada tratamento foram obtidas por meio da diluição de silício líquido em água. A aplicação foi realizada no estágio fenológico V5 utilizando aplicador costal de 20L, até o ponto de escorrimento nas folhas.

### 3.5. Variáveis analisadas

#### 3.5.1. Biometria

A biometria foi avaliada a cada 20 dias a partir de cinco dias após a emergência das plantas, (BELTRÃO, 2001), através das variáveis de crescimento: altura de planta (APL cm) e diâmetro do caule (DCA mm) (figura 6). De posse desses dados foi possível determinar a taxa de crescimento absoluto (TCA cm dia<sup>-1</sup>) em altura de planta obtidos por meio das relações apresentadas em Benicasa (2003) e Floss (2004):

$$TCA = \frac{M2 - M1}{T2 - T1} \quad (1)$$

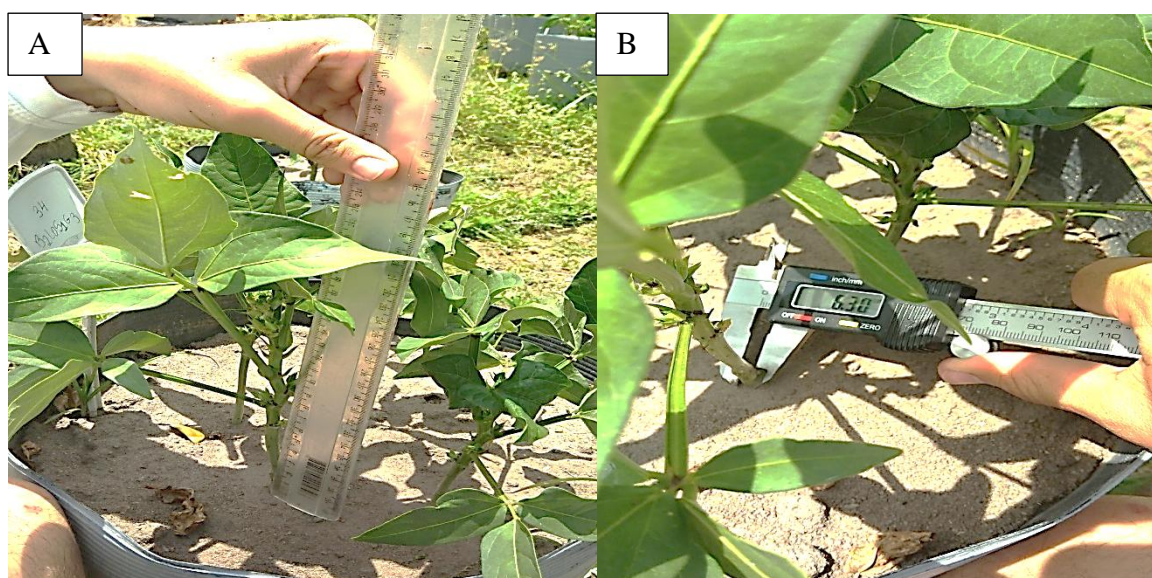
Em que: TCA (taxa de crescimento absoluto), M1 corresponde à medida da altura de planta na época um (T1) e M2 medidas realizada em intervalos até a última avaliação (T2).

Seguindo as relações propostas por esses autores também foi possível determinar a taxa de expansão absoluta (TEA mm dia<sup>-1</sup>) do diâmetro caulinar:

$$TEA = \frac{D2 - D1}{T2 - T1} \quad (2)$$

Onde TEA (taxa de expansão absoluta do diâmetro do caule), D1 corresponde à medida do diâmetro do caule na época um (T1) e D2 medidas realizada em intervalos até a última avaliação (T2).





**Figura 6.** Aferição de dados de crescimento, altura de planta e diâmetro caulinar. Campina Grande, PB, 2018

Por ocasião da análise de potencial hídrico, as plantas foram coletadas para posterior determinação da área foliar total (AFO), massa fresca total da parte aérea (MFT). A área foliar total ( $\text{cm}^2$ ) de cada planta foi estimada, utilizando um medidor de área foliar modelo Li-cor 3100 (Li-Cor Corporation, USA).

### 3.5.2. Variáveis fisiológicas

O potencial hídrico foliar da cultura foi mensurado, Para isto, utilizou-se a segunda folha trifoliar completamente expandida. A medição de potencial hídrico foliar antemanhã ( $\Psi_w$ ) foi determinado no estágio R3. As leituras foram realizadas entre 4 e 6h da manhã, utilizando-se uma câmara de pressão tipo Scholander (SCHOLANDER et al. 1965), modelo 3035 da “Soil Moisture Equipment Corp”, Santa Bárbara, Califórnia (EUA). A escolha do horário se deve ao fato de que o potencial hídrico foliar medido na antemanhã é um indicativo do estado hídrico das plantas.

Para realização da medida de potencial hídrico foliar antemanhã a folha do feijoeiro, após ser destacada do ramo, foi inserida na câmara da bomba deixando-se a base do pecíolo

aparente e aplicou-se uma pressão em carga crescente e gradual até que a seiva xilemática começou a surgir na superfície do pecíolo, cuja observação foi feita com auxílio de luz artificial e lente de aumento (lupa). Nesse momento, realizou-se a leitura do manômetro e a pressão observada correspondeu ao potencial hídrico da seiva xilemática.

### **3.5.3. Atividade das enzimas antioxidantes**

O material vegetal para análise antioxidante foi coletado o folha trifoliar utilizado na mensuração do potencial hídrico e acondicionado em caixa térmica contendo gelo e posteriormente transferidos para refrigerador.

Para a extração enzimática, 200 mg de material fresco foram triturados, separadamente, em 2 mL de tampão fosfato de potássio (concentração final 50 mM e pH final 7) acrescido de ácido ascórbico (0,1 mM), EDTA (0,1 mM) e polivinilpirrolidona (5%). Em seguida os extratos foram centrifugados a 20000 g e temperatura de 4 °C durante 15 minutos. O sobrenadante foi aspirado, alocados em tubos tipo eppendorf e mantidos em refrigerador até o momento das análises. O mesmo foi utilizado para a determinação da atividade das enzimas antioxidantes (SOD e APX).

A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi determinada com base na capacidade de inibição da fotorredução do cloreto de nitrotetrazólio azul (NBT) pela enzima presente no extrato (BEAUCHAMP e FRIDOVICH, 1971). Para tanto, alíquotas de 40 µL do extrato enzimático foram adicionados a tubos de ensaio, protegidos da luz, contendo o meio de reação (1,5 mL) composto por tampão fosfato de potássio (concentração final 100 mM e pH 7,8) acrescido de EDTA (0,1 mM), metionina (13 mM) e cloreto de nitrotetrazólio azul (NBT) (750 mM). A reação foi iniciada pela adição de riboflavina (concentração final 7 µM) e a concomitante transferência dos tubos para a caixa de reação vedada, com iluminação interna (35W) e temperatura ambiente, onde permaneceram durante 15 minutos. Em seguida, as leituras foram realizadas em espectrofotômetro regulado em 560 nm. Foram considerados como brancos da reação, os tubos com extrato mantidos no escuro (os quais representam 0% da redução de NBT) (branco do escuro) e os tubos sem o extrato mantidos sob iluminação (os quais representam 100% da redução do NBT) (branco do claro). Uma unidade de SOD foi considerada como a quantidade de enzima necessária inibir em 50% a fotorredução do NBT

em comparação com o branco do claro, sendo a atividade expressa em  $U \text{ min}^{-1} \text{ mg}$  de massa fresca<sup>-1</sup>. Acrescente-se que as reações foram realizadas em triplicate.

A atividade da ascorbato peroxidase (APX) foi determinada com base no consumo do ascorbato (NAKANO e ASADA, 1981) por meio do monitoramento do decréscimo da absorvância a 290 nm. Para tanto, 100  $\mu\text{L}$  de extrato enzimático foram misturados ao meio de reação (2,7 mL) composto por tampão fosfato de potássio (concentração final 50 mM e pH 6,0) acrescido de ácido ascórbico (0,8 mM). A reação foi iniciada pela adição de 200  $\mu\text{L}$  de peróxido de hidrogênio (2 mM) a solução e com a concomitante transferência da cubeta de quartzo para o espectrofotômetro, onde foi monitorado o decréscimo da absorvância durante 1 minuto, com leituras realizadas a cada 10 segundos. Para a realização dos cálculos também se utilizou da equação de Lambert Beer, tendo como coeficiente de extinção molar o do ascorbato ( $2,8 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ). A atividade final de APX foi expressa em  $\text{nmol}$  de ascorbato  $\text{min}^{-1} \text{ mg}$  massa fresca<sup>-1</sup>.

#### **3.5.4. Quantificação de prolina livre**

A quantificação de prolina livre nos tecidos foi realizada pelo método colorimétrico proposto por Bates et al. (1973) e modificado por Bezerra Neto e Barreto (2011). Para tanto 250 mg de material fresco foram triturados em ácido sulfossalicílico a 3% (5 mL) e centrifugado a 2000 g por 10 minutos, o sobrenadante foi aspirado e utilizado nas determinações. O desenvolvimento da cor foi obtido por meio do aquecimento, em banho-maria regulado a 100 °C, dos tubos de ensaio rosqueáveis contendo a mistura extrato + ninhidrina ácida + ácido acético glacial, na proporção 1:1:1 (volume total 3 mL), durante uma hora. Após esse período os tubos foram resfriados em banho de gelo, sendo posteriormente adicionado 2 mL de tolueno aos mesmos, os quais foram agitados vigorosamente por 20 segundos e mantidos em repouso por 10 minutos, para que ocorresse a separação das fases. Acrescente-se que o sobrenadante foi aspirado, alocado em cubeta de vidro e transferido para espectrofotômetro onde se obteve a leitura da absorvância no comprimento de onda de 520 nm, utilizando o tolueno puro como branco. Em seguida, a concentração de prolina livre foi quantificada com base na curva padrão de L- prolina (0, 5,

10, 15, 20, 25, 50 mg L<sup>-1</sup> ) e expressa em  $\mu\text{mol g de matéria fresca}^{-1}$ . Para o cálculo de prolina foi utilizada a média da absorbância obtida na triplicata.

### **3.5.5. Análises estatísticas**

Os dados foram submetidos à análise de variância (teste F,  $p < 0,05$ ). para as lâminas de irrigação o teste de pares independentes (t de Student,  $p < 0,05$ ), o teste de comparação de médias (Tukey,  $p < 0,05$ ) para os genótipos e doses de silício, utilizando-se do software SISVAR 5.6.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Variáveis de crescimento

Avaliou-se a influência do Si sobre a altura de planta, diametro do caule, área foliar total (AFO em  $\text{cm}^2$ ) e massa fresca total da parte aérea (MFT em g).

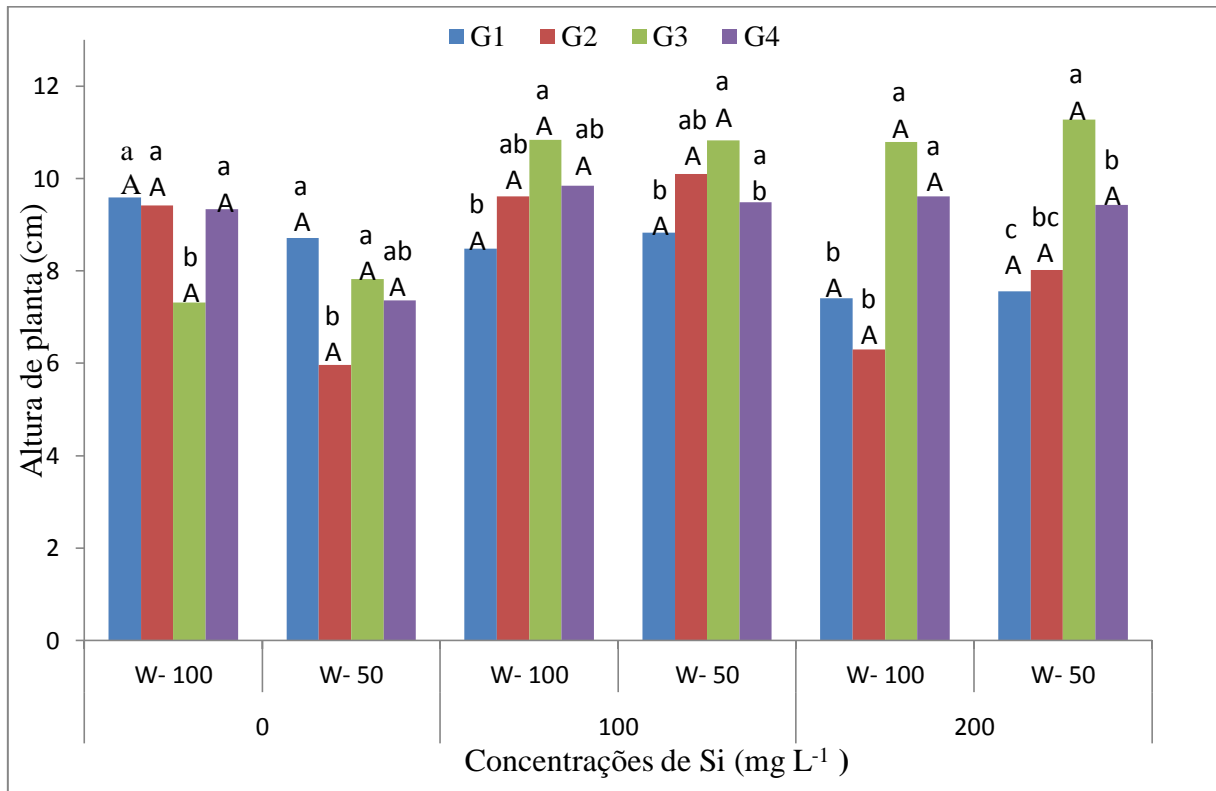
Quanto à altura de planta, observou-se redução dessa variável nos cultivares BRS Itaim, BRS Aracé e BRS Rouxinol sob restrição hídrica e sem aplicação de Si. Efeito que foi revertido pela aplicação de Si, que proporcionou aumento de 30.43% na altura, tratado com  $100 \text{ mg L}^{-1}$  de Si em comparação ao sem Si (Figura 7).

Resultados semelhantes foram encontrados por Ferraz et al. (2012) que constataram efeitos significativos na aplicação foliar do silício na altura (cm) do algodoeiro com concentrações de até  $94,3 \text{ mg L}^{-1}$ , concentrações maiores promoveram decréscimos na altura da planta (Figura 7).

As maiores medias observadas foram do BRS Aracé e BRS Rouxinol, tanto nas condições de 100% e 50% da disponibilidade hídrica e presença de Si. No BRS Aracé foram 10,836 cm e 10,794 cm nas condições de 100% de reposição hídrica e 100 e  $200 \text{ mg L}^{-1}$  de Si, respectivamente; 10,826 cm e 11,28 cm nas condições de 50% de reposição hídrica 100 e  $200 \text{ mg L}^{-1}$  de Si, respectivamente. Já no BRS Rouxinol foram 9,84 cm e 9,48 cm nas condições de 100% de lâmina e 100 e  $200 \text{ mg L}^{-1}$  de Si, respectivamente; 9,61 e 9,42 nas condições de 50% lâmina 100 e  $200 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente (Figura 7). Indicando que esse elemento promove melhora na expansão e manutenção da altura nesses genótipos.

Segundo Mostafa et al. (2018), avaliando o efeito de cinco concentrações de si (0.0, 140, 280, 420 e  $560 \text{ mg L}^{-1}$  Si) e lâminas de irrigação sob o Arroz, observaram que o Si estimulou o crescimento sob condições de seca, aumentando 38% na altura da planta quando a taxa de Si aumentou de 0 para a dose mais elevada. Ainda nesse estudo, os autores verificaram que não só a aplicação de Si aumentou a altura das plantas sob estresse hídrico,

mas também aumentou a altura das plantas onde não havia estresse hídrico. Corroborando com o que observado no presente ensaio.



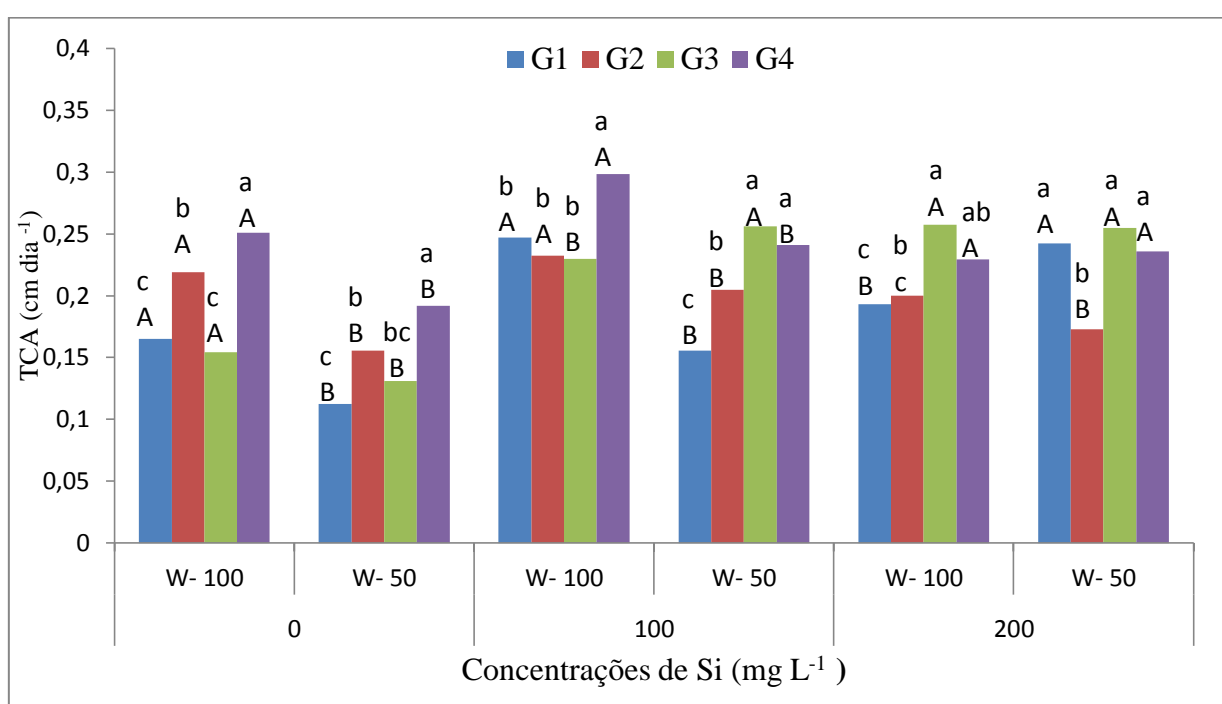
**Figura 7.** Altura de planta dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018

Observou-se redução de 31,06% e 34,76% na TCA em todos os genótipos na condição de estresse e sem Si quando relacionados os valores obtidos nas plantas submetidas à aplicação de Si nas concentrações de 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 8). O que indica uma recuperação dos cultivares sob aplicação de Si.

Nas concentrações de 100 e 200 mg L<sup>-1</sup> de Si, valores mais expressivos de taxa de crescimento absoluto (0,298) e (0,229) foram registrados no BRS Rouxinol e 100%; e valores de 0,256 e 0,254 no BRS Aracé e 50%, respectivamente. No entanto, os valores

obtidos na condição de estresse não diferiram estatisticamente dos (0,241) e (0,236) do BRS Rouxinol (Figura 8).

LIMA et al. (2011) salientam que o silício possui efeito benéfico sobre o organismo vegetal, notadamente, por atuar na otimização dos processos bioquímicos e fisiológicos refletindo-se no crescimento absoluto das culturas. Nesse sentido, o aumento da taxa de crescimento absoluto mensurado nas cultivares feijão-caupi está atrelado ao efeito indireto do silício sobre as características fisiológicas, tendo essas refletindo no crescimento das plantas.



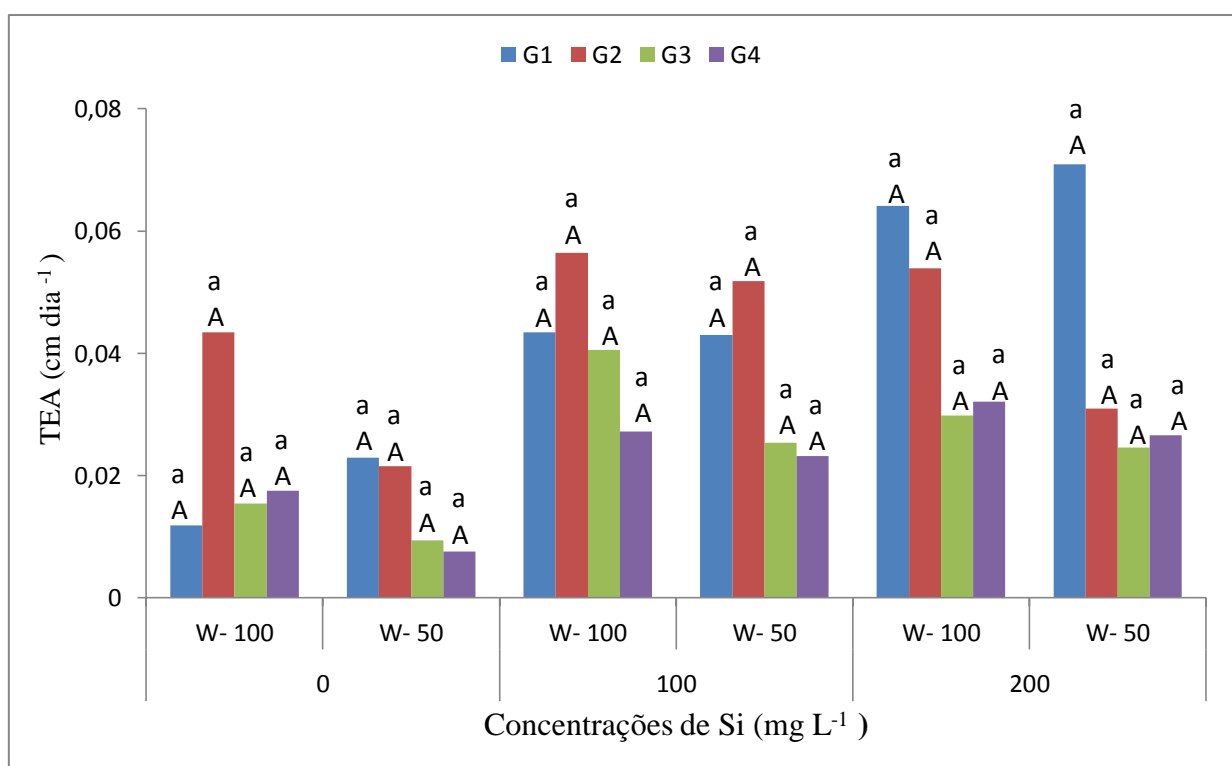
**Figura 8.** Taxa de crescimento absoluta (TCA) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018

A TEA não sofreu alteração com a imposição dos regimes hídricos, as médias não se diferenciam estatisticamente (Figura 9).. Contudo, observou-se que a aplicação do Si proporcionou melhor deste fator.

Sendo assim, aumentos expressivos de 67,69% foram registrados para o BRS Guariba, 61,85% e BRS Aracé e 71,39% BRS Rouxinol na condição de 50% de lâmina de irrigação e 200 mg L<sup>-1</sup> de Si em comparação ao sem Si. Ressalta-se que sobre as mesmas condições de irrigação o BRS Itaim obteve seu melhor desempenho na dosagem de 100 mg L<sup>-1</sup>, com incremento de 58,39% em sua expansão caulinar (Figura 9).

O Si foi um potencializador na condição de 100% de lâmina de água, mantendo os níveis mais elevados da TEA, os resultados de incremento mais significativos foram observados no BRS Aracé (61,86%) e BRS Guariba (80,62%) dose de 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 9).

Existe uma tendência natural de otimização no processo de crescimento das plantas sob aplicação desse element químico, notadamente, por potencializar o aumento dos níveis de enzimas antioxidantes, capacidade fotossintética e por criar condições para bom crescimento e desenvolvimento pleno das culturas (ZUCCARINI, 2008). Nesse sentido, pode inferir que o aumento da taxa de expansão relativa em diâmetro caulinar pode ser explicada pelo incremento da concentração de silício nas soluções de pulverização.



**Figura 9.** Taxa de expansão absoluta (TEA) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018



Quanto ao AFO, Pode-se observar que as cultivares que não receberam Si e sob restrição hídrica obtiveram valores médios sempre inferiores a dosagem de 200 mg L<sup>-1</sup> sob a mesma condição, o efeito do Si proporcionou aumento de 42,18% nessa situação. Comparando-se os regimes hídricos, não diferiram estatisticamente. Excetuando-se o BRS Itaim na concentração de 200 mg L<sup>-1</sup> que apresentou uma média (60,06 cm<sup>2</sup>) em regime hídrico normal e (219,08 cm<sup>2</sup>) no reduzido (Figura 10).

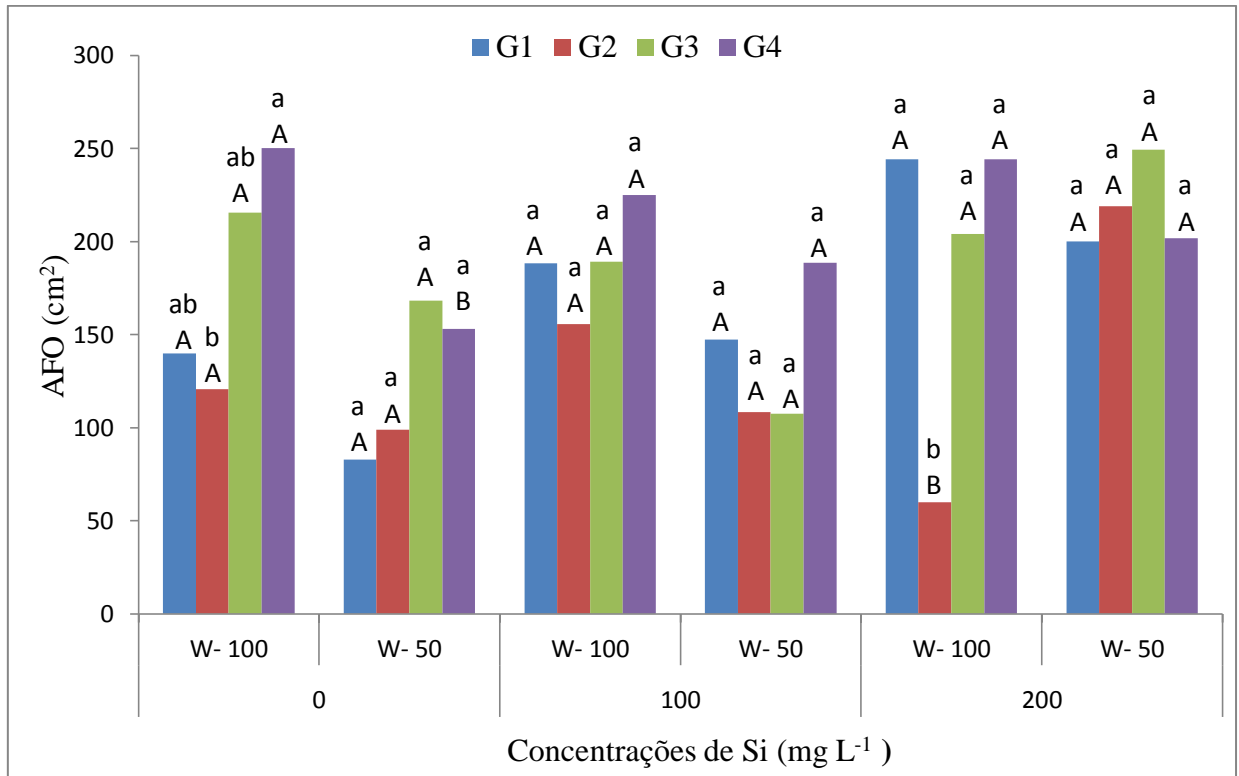
Maghsoudi et al. (2015), estudando efeito atenuador do Si em quatro cultivares de trigo, relataram aumento significativo da área foliar pela aplicação de 6 mM de Si, embora a área foliar de todas as quatro cultivares de trigo tenha diminuído significativamente pelo estresse hídrico, contudo essa redução foi menor nas plantas tratadas com Si em comparação às plantas não tratadas.

Analisando os genótipos entre as concentrações de Si, sem restrição hídrica, verificou-se aumento 66,78% de AFO no BRS Guariba com 200 mg L<sup>-1</sup> em comparação ao tratamento sem Si. Situação semelhante pode-se observar no BRS Itaim com aumento de 54,87%. Destaca-se o comportamento do BRS Aracé com redução de 36,23% de AFO na concentração de 100 mg L<sup>-1</sup> e posterior aumento de 32,46% com 200 mg L<sup>-1</sup> em relação ao tratamento sem Si (Figura 10).

Ressaltar-se que o BRS Itaim e BRS Aracé apresentaram as maiores médias, (219,08 cm<sup>2</sup>) e (249.36 cm<sup>2</sup>), respectivamente, sob restrição hídrica e 200 mg L<sup>-1</sup> de Si (Figura 10). A área foliar gradativamente maior até a dose mais elevada nas plantas pode ter ocorrido pelo fato de o silício aumentar o teor relativo de água na folha, proporcionando maior pressão de turgor nas células, favorecendo a expansão celular e proporcionando maior área foliar.

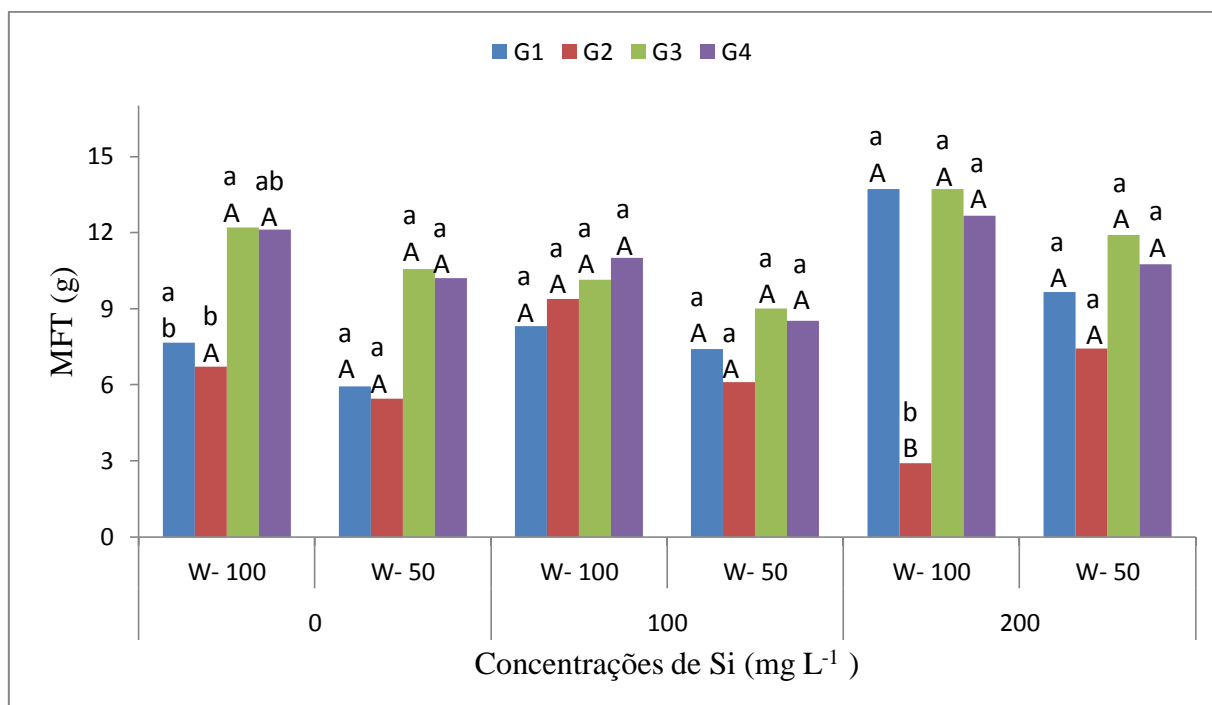
De acordo com Ahmed et al. (2011), plantas de sorgo submetidas a 200 mg L<sup>-1</sup> de silicato de potássio produziram maior área foliar em comparação com o controle, concordando com o observado no presente estudo.

Lima Filho (2005), trabalhando com a cultura do trigo suplementada com silício, apresentou maior área foliar em plantas com deficit hídrico. Os resultados observados no presente trabalho demonstrando que a cultura do feijoeiro é favorecida pela aplicação do Si, tanto nas condições de déficit hídrico ou nas condições de pleno fornecimento de água sa plantas.



**Figura 10.** Área foliar total (AFO) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018

Para o MFT, não observou-se diferenças significativas entre os tratamentos no presente estudo. Exceto o genótipo BRS Itaim (2,91 g) na concentração de 200 mg L<sup>-1</sup> registrando a menor média (Figura 11).



**Figura 11.** Massa fresca total (MFT) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018

#### 4.2 Variável fisiológica

Para o potencial hídrico foliar, avaliando-se o efeito do Si sob a condição de 50% de lâmina de água, observou-se aumento dessa variável nas cultivares BRS Itaim (41,97%) e BRS Rouxinol (28,57%) com a aplicação do Si de 100 mg L<sup>-1</sup> em relação a sem Si. Característica que se repete para o BRS Itaim na dose 200 mg L<sup>-1</sup>, contudo o BRS Rouxinol

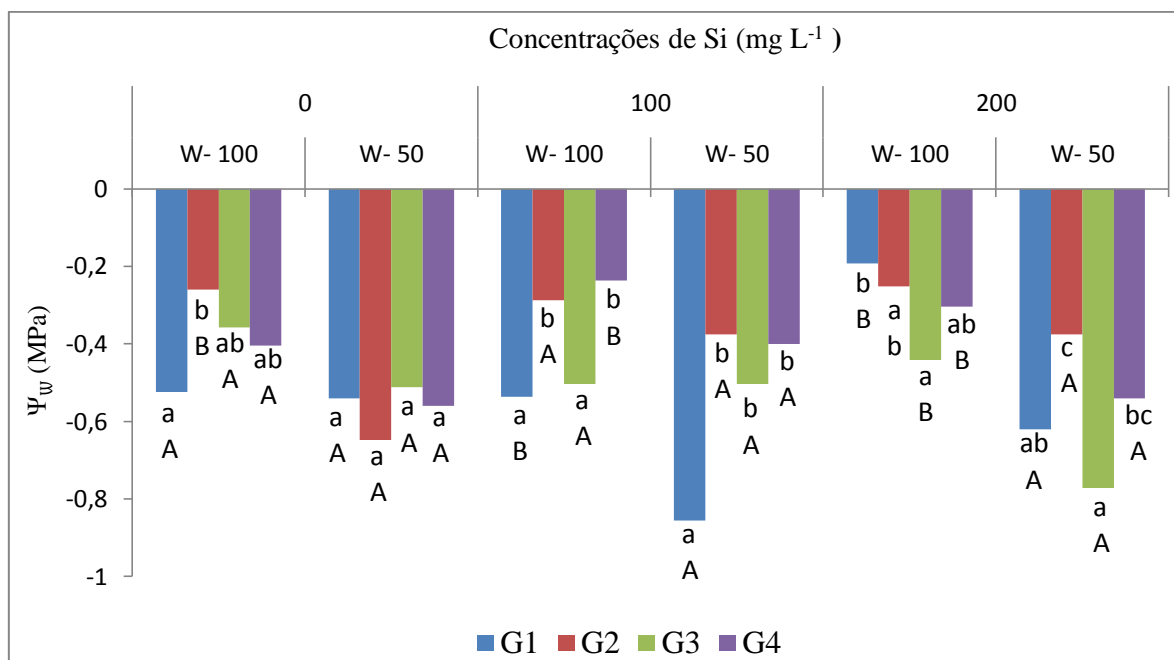
demonstrou redução comparado-se suas medias -0,4 MPa e -0,54 MPa nas aplicações de 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 12).

Gong e Chen (2012) relataram que o potencial hídrico foliar de plantas de trigo sob aplicação de silício e estressadas pela seca são mantidos maior em comparação com plantas estressadas sem aplicação de silício, sugerindo que o silício pode melhorar o estado da água do plantas trigo durante a seca. Um fenômeno semelhante foi observado por Pei et al. (2010) em trigo exposto ao polietileno glicol induzido estresse hídrico.

Já no cultivar BRS Guariba, ainda na condição de estresse, registrou-se redução 36,91% e 12,9% do potencial hidrico foliar com a aplicação do Si nas doses 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. O mesmo pode ser observado para o BRS Aracé, que apesar de manter a média constante para a dose 100 mg L<sup>-1</sup>, verifica-se redução de 33,67% na dose 200 mg L<sup>-1</sup> (Figura 12).

Quanto à condição hídrica de 100%, o BRS Rouxinol aumentou em 41,58% o seu potencial hidrico com aplicação de 100 mg L<sup>-1</sup> de Si. Como também, podemos observar maior increment 63,35% no BRS Guariba e 200 mg L<sup>-1</sup> de Si. Já no cultivar BRS Itaim não foi registrado variação no potencial hidrico com a aplicação das doses de silicio. No entanto, no BRS Aracé registou-se redução de 28,96% para a dose 100 e 19% para a dose 200 mg L<sup>-1</sup> (Figura 12).

Hattori et al. (2007) estudando duas doses de silicio (0 e 1,67 mM) em mudas de Sorgo, verificou que o potencial hidrico foliar nas plantas sob estresse e ausência de Si foram significativamente menores que os das plântulas com Si sob estresse. Na ausência de estresse hídrico, os potenciais hídricos foliares não foram afetados pela aplicação de silício. Resultados na ausência de estresse hídrico que contrastam com os observados no presente estudo.



**Figura 12.** Potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018

### 4.3 atividade das enzimas antioxidantes

A produção de ROS é afetada por fatores ambientais e fisiológicos, sendo que a taxa de aumento ocorre quando a intensidade de fótons é superior ao necessário para a assimilação de CO<sub>2</sub> (ASADA, 2006). Sendo este potencialmente prejudicial para o aparato fotossintético. Dessa forma, o mecanismo de desintoxicação constitui a primeira linha de defesa contra os efeitos prejudiciais do estresse oxidativo (GRATÃO et al, 2005).

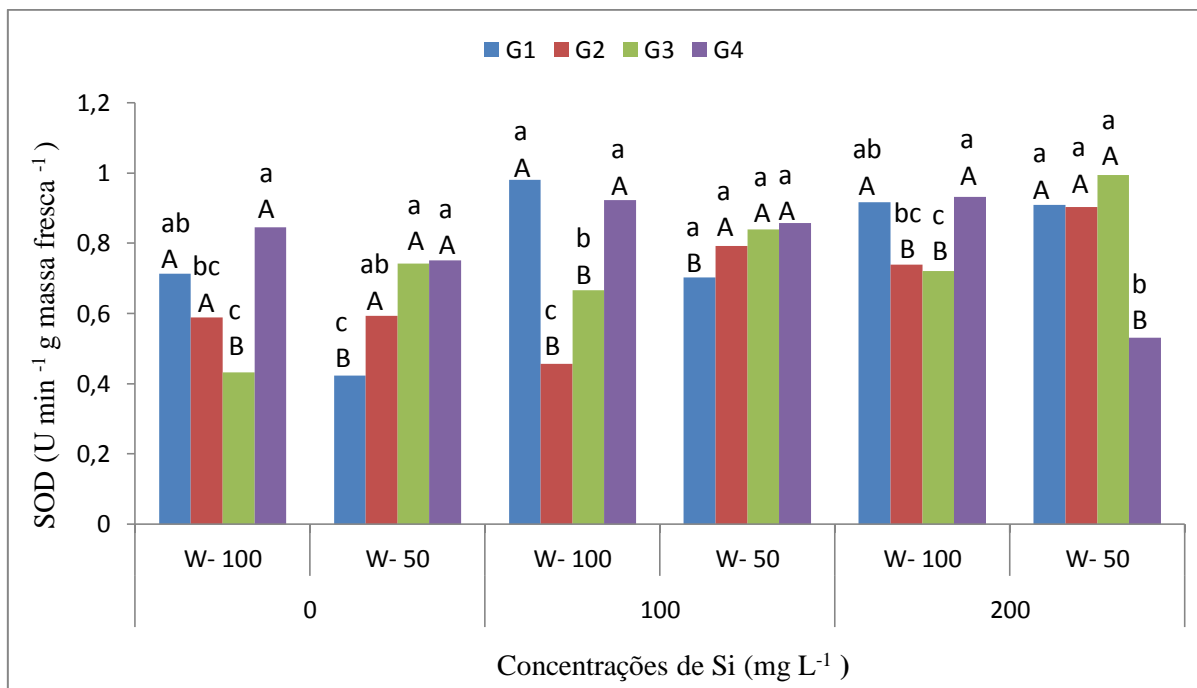
A SOD é a primeira enzima envolvida no sistema de defesa das plantas quando a célula detecta um sinal de estresse, sendo ela responsável pela formação direta de diferentes espécies reativas de oxigênio (APEL; HIRT, 2004; SANKAR et al., 2007). Sendo esta enzima responsável por dismutar o radical superóxido (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>) em peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (GILL; TUTEJA, 2010).

Avaliando-se a condição de 50% de água, verificou-se que os genótipos BRS Guariba, BRS Itaim e BRS Aracé sob concentração de 200 mg L<sup>-1</sup> de Si obtiveram os maiores percentuais de atividade enzimática de SOD, 53,49%, 34,4% e 24,48%, respectivamente, em comparação com os tratamentos sem Si. Contudo, o BRS Rouxinol demonstrou redução na atividade da SOD sob a concentração mais elevada de Si e restrição hídrica, diferenciando-se estatisticamente dos demais. Acrescenta-se, na lâmina de 50% no IBRS Rouxinol registrou-se melhor desempenho na atividade enzimática na dose de 100 mg L<sup>-1</sup> de Si, aumentando 12,34% em relação à sem a presença do Si (Figura 13).

Na condição 100% de água, o BRS Guariba (27,14%) e BRS Rouxinol (8,35%) demonstraram maior atividade da SOD na concentração de 100 de Si, valores semelhantes foram observados na concentração 200 mg L<sup>-1</sup> de Si. Enquanto que os BRS Itaim e BRS Aracé obtiveram sua maior atividade na dose 200 mg L<sup>-1</sup> de Si, 20,28% e 40,1%, respectivamente (Figura 13).

Comparando-se as lâminas de irrigação, verificou-se que sem a aplicação do Si apenas o BRS Aracé aumentou em 41,85% a atividade enzimática, na condição de redução hídrica, os demais genótipos não diferiram estatisticamente do tratamento controle. Com a aplicação do Si, registrou-se aumento 42,44% no BRS Itaim na dose 100 mg L<sup>-1</sup> e 27,56% BRS Aracé na dose 200 mg L<sup>-1</sup> de Si (Figura 13).

Alzahrani et al. (2018) avaliando o efeito do Si sob o estresse hídrico, salino e cádmium verificou aumento mais expressivo da SOD na dose de 4 mM de Si. Dessa forma, em seu ensaio na condição de redução da lâmina de irrigação observaram incremento em 16,74% em comparação à sem aplicação de Si, enquanto que em relação às plantas sem restrição hídrica (controle) e sem aplicação de Si, o aumento foi de 36,37% na atividade da SOD.



**Figura 13.** Atividade da enzima Superóxido dismutase (SOD) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018

Após a dismutação do superóxido em peróxido de hidrogênio pela SOD existe a necessidade da atuação de peroxidases para a conversão de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em produtos não tóxicos. A primeira enzima a atuar na conversão do peróxido de hidrogênio em água é a APX, que possui a maior afinidade ao substrato (AHMAD et al, 2010)

Sob condição de restrição hídrica foi possível observar aumento na atividade da APX em todas as cultivares quando comparadas à sem aplicação de Si, sendo que os aumentos mais expressivos foram de BRS Guariba (81,5%), BRS Aracé (66,39%) e BRS Rouxinol (53,54%) com aplicação de 200 mg L<sup>-1</sup> de Si (Figura 14).

Ainda em condição de 50% de lamina, podemos destacar que no BRS Itaim, observou-se aumento de 78,81% na dose 100 mg L<sup>-1</sup> em relação a sem Si. Contrainstando com redução na dose 200 mg L<sup>-1</sup>, média (15,95 nmol de ASC min<sup>-1</sup>g massa fresca<sup>-1</sup>),

desempenho estatisticamente inferior ao demais na quantidade de APX. Indicando um possível efeito deletério do Si em concentrações mais elevadas sobre esse cultivar (figura 14).

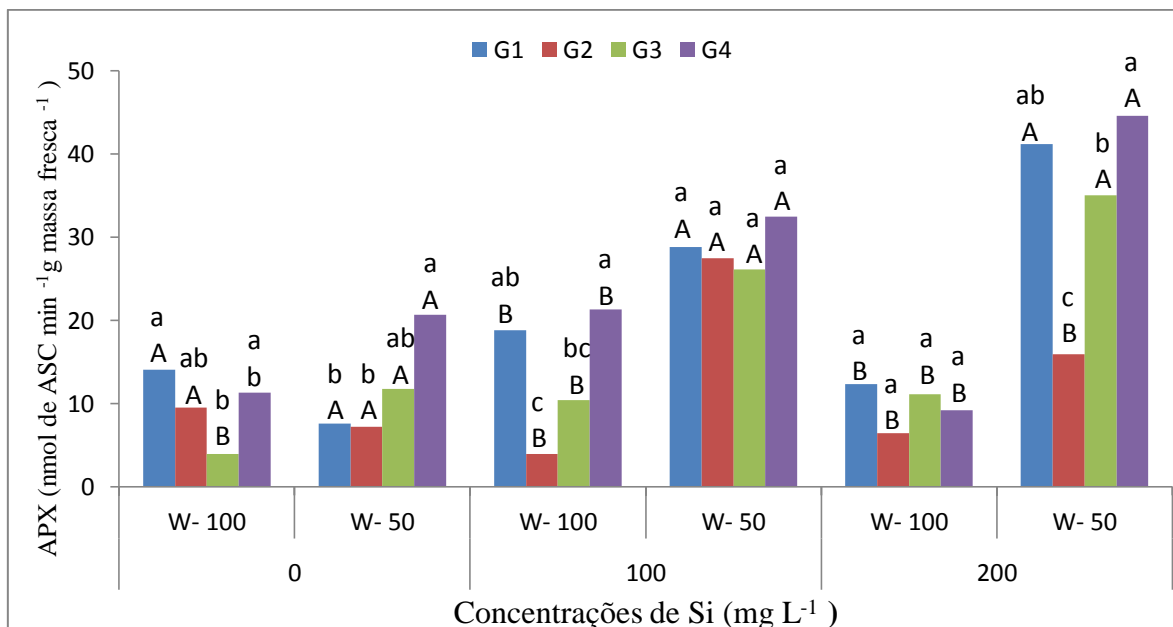
Avaliando-se a condição com 100% de água, pode-se observar que o BRS Rouxinol obteve aumento de 46,94% no comparativo com e sem a presença do Si. A menor média de atividade da APX foi registrado no BRS Aracé (3,92 nmol de ASC min<sup>-1</sup>g massa fresca<sup>-1</sup>) sem aplicação de Si e igual valor no BRS Itaim na concentração de 100 mg L<sup>-1</sup>(Figura 14).

No comparativo entre as lâminas e Si na dose 200 mg L<sup>-1</sup>, verificou-se elevado aumento nos cultivares BRS Guariba, BRS Aracé e BRS Rouxinol na atividade da APX sob 50% em relação a 100% da condição hídrica. Fato interessante, também, observado foi sem a aplicação do Si em que os BRS Aracé e BRS Rouxinol elevaram o acúmulo mesmo sem a presença do atenuador, contudo em menor escala. Mesmo assim, sugere que tais cultivares tenham uma melhor tolerância ao estresse por deficiência hídrica (Figura 14).

Biju et al. (2017) avaliando a respostas bioquímicas da letilha sob estresse hídrico e aplicação de silício verificou que, o tratamento com Si estimulou a atividade enzimática em 52% a 54% em plântulas tolerantes à seca, 65% a 70% em moderada tolerância à seca e 80% a 85% em genótipos suscetíveis à seca quando comparados a tratamentos de estresse hídrico sem aplicação do Si.

De forma semelhante, Hasanuzzaman et al. (2018), estudando o efeito silício na regulação da defesa antioxidante em *Brassica napus* L. observou que quando tratados com Si, a atividade de APX aumentou em 25 e 13%, sob estresse moderado e severo, respectivamente, em comparação com as mudas expostos ao mesmo nível de estresse hídrico sem o Si.





**Figura 14.** Atividade enzima Ascorbato peroxidase (APX) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018.

#### 4.4 Teor de prolina livre

Em geral, o teor de prolina nas folhas aumenta com o declínio da disponibilidade hídrica, sugerindo que a produção de prolina é provavelmente uma resposta comum sob condições de deficiência hídrica (FARHAD et al., 2011).

Quanto ao PRL, observou-se na condição de restrição hídrica aumento de 56,72% na atividade da prolina no genótipo BRS Guariba com a aplicação do Si na concentração de 100 mg L<sup>-1</sup> de Si em comparação à sem aplicação de Si. Enquanto que a atividade da prolina no genótipo BRS Aracé foi mais responsiva na concentração de 200 mg L<sup>-1</sup> de Si com aumento de 85,38% em relação ao tratamento sem aplicação de Si (Figura 15).

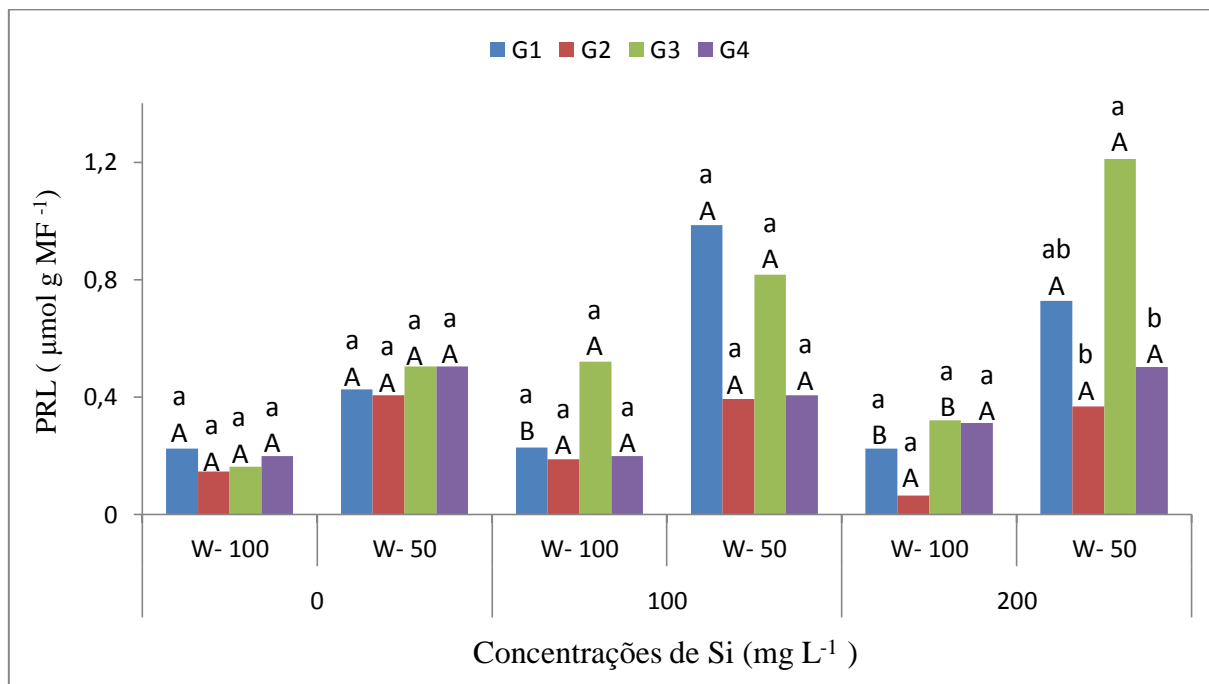
Resultados significativos de prolina em função da aplicação de silício também foram encontrados por Mauad (2006), avaliando o desenvolvimento e marcha de absorção de silício em plantas de arroz sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada.

A redução da lâmina de irrigação incrementou a atividade da prolina, contudo, apenas o genótipo BRS Guariba na concentração de 100 mg L<sup>-1</sup> de Si diferenciou significativamente

entre as lâminas utilizadas, o incremento foi de 76,82% sob restrição hídrica. Observou-se também que na concentração de 200 mg L<sup>-1</sup> de Si, o genótipo BRS Aracé registrou diferença estatística entre as lâminas de irrigação, com aumento de 74,27% na lâmina reduzida (Figura 15).

Para Alzahrani et al. (2018) avaliando o efeito do Si nas plantas trigo verificou aumento mais expressivo no teor de prolina livre na dose de 4 mM de Si. Dessa forma, em seu ensaio na condição de redução da lâmina de irrigação observaram incremento em 37,68% em comparação à sem aplicação de Si, enquanto que em relação às plantas sem restrição hídrica (controle) e sem aplicação de Si, o aumento foi de 56,88% no teor de prolina livre.

Segundo Lobato et al (2008), o acúmulo de prolina em folhas de soja cv. Sambaiba aumentou 67% sob déficit hídrico. Altos níveis de prolina permitem que a planta mantenha o potencial da água baixo porque o acúmulo de osmólitos compatíveis permite que as plantas absorvam mais água do ambiente, dessa forma, amenizando o efeito do déficit hídrico no organismo (MOUSA e ABDEL-AZIZ, 2008).



**Figura 15.** Teor de prolina livre (PRL) dos genótipos de feijão-caupi: BRS Guariba (G1), BRS Itaim (G2), BRS Aracé (G3), BRS Rouxinol (G4), condicionados a dois regimes hídricos (W-100 e W-50) e três concentrações de Si (0; 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>). Letras minúsculas diferenciam os genótipos. Letras maiúsculas diferenciam as duas condições hídricas. Campina Grande, PB, 2018

## 5. CONCLUSÕES

O silício proporcionou atenuação do déficit hídrico com aumento no crescimento e no desenvolvimento dos cultivares de feijão-caupi.

As enzimas antioxidantes SOD e APX foram potencializadas com a aplicação foliar de silício, aumentando a tolerância das cultivares ao déficit hídrico.

Os cultivares BRS Guariba e BRS Aracé expressaram aumento no teor de prolina, sob déficit hídrico e suplementados com Si, o que promoveu maior osmoproteção as plantas.

## REFERÊNCIAS

- AGBICODO, E.M.; FATOKUN, C.A.; MURANAKA, S.; VISSER, R.G.F.; LINDEN, C.G. Breeding drought tolerant cowpea: Constraints, accomplishments, and future prospects. **Euphytica**, v.167, p.353–370, 2009.
- AGOSTINI, E. A. T.; MACHADO-NETO, N. B.; CUSTÓDIO, C. C. Induction of water deficit tolerance by cold shock and salicylic acid during germination in the common bean. **Acta Scientiarum**, v.35, n.2, p. 209-219, 2013.
- AHMED, S.; HASSEN, F. U.; QADEER, E.; ALAM, M. A. silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. **Africa Journal of Agricultural Research**. v. 3, p. 594-607, 2011.
- AHMAD, P.; JALLEL, C. A.; SALEM, M.A; NABI, G.; SHARMA, S. roles of enzymatic and nonezymatic antioxidants in plants during abiotic stress. **Critical Reviews in Biotechnology**. v. 30, p. 161-175, 2010.
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction. **Annual Review of Plant Biology**. n. 55, p. 373-399. 2004.
- ARNON, D.I., STOUT, P.R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, n. 14, p. 371-375, 1939.
- ASADA, K. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. **Plants Physiology**. v. 8141, p. 391-396, 2006
- BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGERA, N. K.; DANNOFF, L. E.; SILVA, O. F. silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 25, p. 325 – 330, 2001.

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

BEAUCHAMP, C.; FRIDOVICH, I. Superoxide dismutase – improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. **Analytical Biochemistry**, v.44, n.1, p.276-287, 1971.

BEEBE, S.E.; RAO, I.M.; BLAIR, M.W.; ACOSTA-GALLEGOS, J.A. Phenotyping common beans for adaptation to drought. **Front Plant Physiology**, v.4, n.35, p.1–20, 2013.

BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife: UFRPE, 2011. 267 p.

BIJU, S., FUENTE, S., GUPT, D. Silicon improves seed germination and alleviates drought stress in lentil crops by regulating osmolytes, hydrolytic enzymes and antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry**. v. 119, p. 250-264, 2017.

BIN, T.; SHANG-ZHONG, X.; XI-LING, Z.; YONG-LIAN, Z.; FA-ZHAN, Q. Changes of antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of waterloggingtolerant and waterlogging-sensitive maize genotypes at seedling stage. **Agricultural Sciences in China**. n. 9, p. 651-661, 2010.

BOWEN, P., MENZIES, J. & EHRET, D. Soluble silicon spray inhibit powdery mildew development on grape leaves. **Journal of the American Society for Horticultural Sciences**, v. 117, p. 906-912. 1992.

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the determination of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v.72, p.248- 254, 1976.

BUCK, G.B.; KORNDÖRFER, G.H.; NOLLA, A.; COELHO, L. Potassium silicate as foliar spray and rice blast control. **Journal of Plant Nutrition**, v.31, n.2, p.231-237, 2008.

CALVACHE, M.; REICHARDT, K. Water deficit imposed by partial irrigation at different growth stages for common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **In: iaea tecdoc 888, nuclear techniques to assess irrigation schedules for field crop**. p.63-72, 1996.

CARVALHO, D.F.; OLIVEIRA NETO, D.H.; FELIX, L.F.; GUERRA, J.G.M.; SALVADOR, C.A. Yield, water use efficiency, and yield response factor in carrot crop under different irrigation depths. **Ciência Rural**, v.56, n.7, p.1145-1150, 2016.

CARVALHO, J. DE A.; PEREIRA, G. M.; ANDRADE, M. J. B. DE; ROQUE, M. W. Efeito do déficit hídrico sobre o rendimento do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 24, n. 3, p. 710-717, 2000.

CLAVEL, D.; DRAME.; N.K.; ROY-MACAULEY, H.; BRACONNIER, S.; LAFFRAY, D. Analysis of early responses to drought associated with field drought adaptation in four Sahelian groundnut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars, **Environment and Experimental Botany**, v.54, p.219–230, 2005.

CONAB. acompanhamento da safra brasileira de grãos v. 5 - Safra 2017/18, n.7 -Sétimo levantamento, Brasília-DF, abril 2018.

CRUSCIOL, C. A.C.; PULZ, A. L.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P.; LIMA, G. P. P.Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. **Crop Science**, v. 49, p. 949-954, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Socioeconomia. Disponível em < <http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm> >. Acesso em: 30 jun. 2018

FERRAZ, R.L.S; BELTRÃO, N.E.M.; MELO, A.S.; MAGALHÃES, I.D.; FERNANDES, P.D.; ROCHA, M.S. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.2, p.735-748, 2014.

FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; ROCHA, M. de M.; SILVA, K. J.D. e; NOGUEIRA, M.S.R.; RODRIGUES, E.V. **Feijão-caupi no Brasil**: produção, melhoramento genético, avanços e desafios: Embrapa Meio-Norte, p.84, 2011.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ALCÂNTARA, J. dos P.; BELARMINO FILHO, J.; ROCHA, M. de M. BRS Marataoã: novo cultivar de feijão-caupi com grão tipo sempre-verde. **Revista Ceres**, v. 52, n. 303, p. 771-777, 2005.

GAO X.; ZOU C.; WANG L.; ZHANG F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plants Nutrition**, v.29, p 1637 – 1694. 2006.

GONG, H J; CHEN, K M. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. *Acta Physiol Plant* v. 34, p. 1589–1594, 2012.

GONG, H. J.; ZHU, X. Y.; CHEN, K. M.; WANG, S. M.; ZHANG, C. C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, n. 2, p. 313-321, Aug. 2005.

GRATÃO, P.L.; POLLE, E.; LEA, P.J.; AZEVEDO, R.A. Making the life heavy metal-stress plants a little easier. **Functional Plant Biology**, v. 32, p. 481-498, 2005.

GUNES, A.; KADIOGLU, Y. K.; PILBEAM, D. J.; INAL, A.; COBAN, S.; AKSU, A. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, II: Essential and nonessential element uptake determined by polarized energy dispersive X-ray fluorescence. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, n. 13-14, p. 1904-1927, 2008.

GUNES, A.; PILBEAM, D. J. INAL, A.; BAGCI, E. G.; COBAN, S. Influence of silicone on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivar under drought stress. **Journal of Plant interactions**, v. 2, p. 105-113, 2007.

HALL, A.E., CISSE, N.; THIAW, S.; ELAWAD, H.; EHLERS, J.D.; ISMAIL, A.M.; FERY, R.; ROBERTS, P.A. ; KITCH, L.W.; MURDOCK, L.L.; BOUKAR, O.; PHILLIPS, R.D. ; MCWATTERS, K.H. Development of cowpea cultivars and germplasm by the cean/cowpea CRSP. **Field Crops Research**, v.82, p.103–134, 2003.

HALLIWELL, B. Oxidative damage, lipid peroxidation and antioxidant protection in chloroplasts. **Chemistry Physic Lipids**, v. 44, p. 327-340, 1987.

HASANUZZAMAN, M., NAHAR. K., ANEE, T.I., KHAN, M.I.R., Fujita, M. Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus* L. **South African Journal of Botany**. n.115, p. 50–57, 2018.

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

Hussain, H.A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum S.A., Men, S., Wang, L. Chilling and Drought Stresses in Crop Plants: Implications, Cross Talk, and Potential Management Opportunities. **Frontiers in Plant Science**. v. 9: 393, 2018.

Hussain, S., Khan, F., Cao, W., Wu, L., and Geng, M. Seed priming alters the production and detoxification of reactive oxygen intermediates in rice seedlings grown under sub-optimal temperature and nutrient supply. **Front. Plant Sci**. 7:439, 2016.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. de. Silicato de cálcio e magnésio na agricultura, 2002, 23p.

KORNDORFER, G. H. Eficiência do silício como corretivo de solo. **Revista Campo e Negócios**, ano 4, n. 42, p. 84-85, 2006.

KRUTMAN, S.; VITAL, A. F.; BASTOS, E. G. **Variedades de feijão macassar** *Vigna sinensis* L.: manual - características e reconhecimento, p.46, 1968.

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**, v. 54, p. 678-685, 2005.

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



- LISAR, S. Y. S.; MOTAFAKKERAZAD, R.; HOSSAIN, M. M.; RAHMAN, I. M. M. Water stress in plants: causes, effects and responses. In RAHMAN, I. M. M, **Water Stress**, Rijeka: INTECH, p. 1-14. 2012,
- LOBATO, A. K. S.; OLIVEIRA NETO, C. F.; COSTA, R. C. L.; SANTOS FILHO, B. G.; CRUZ, F. J. R.; NEVES, H. K. B.; LOPES, M. J. S. Physiological and biochemical behavior in soybean (*Glycine max* cv. Sambabia) plants under water deficit. **Australian Journal of Crop Science**, e, v. 2, p. 25-23, 2008.
- LUZ, J. M. Q.; RODRIGUES, C. R.; CARVALHO, P. C.; CANTUÁRIO, F. S.; SOUSA, V. B. F. Aplicação de silicato de potássio via foliar em morangueiro: produtividade e qualidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 50. **Anais**, 2010.
- MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends Plant Sci.**, v.11. n.8. p.392-397, 2006.
- MAGHSOUDI, KOBRA; EMAM, YAHYA; ASHRAF, MUHAMMAD. Foliar Application of Silicon at Different Growth Stages Alters Growth and Yield of Selected Wheat Cultivars, **Journal of Plant Nutrition**. 2015.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2. ed. **New York: Academic Press**, p.887, 1995.
- MAUAD, M. desenvolvimento e marcha de absorção de silício em plantas de arroz sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada. Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Agricultura. 109 f. 2006.
- MENZIES, J. G; CHERIF, M; BENHAMOU, N; BELANGER, R.R. silicon induced resistance in cucumber plants against *Phytophthora ultimum*. **Physiological and molecular plant pathology**. V. 41, n. 6, p. 411-425, 1992.
- MERRIGHI, A. L. N.; FERNANDES, A. L. T.; FIGUEIREDO, F. C. Novas pesquisas reforçam os efeitos do silício líquido solúvel aplicado via foliar em cafeeiros. **Revista Campo e Negócios**, ano 4, n. 56, p. 25-27, 2007

MITANI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plants species. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, p. 1255 – 1261, 2005.

MOHSENI, V.G.; SABBAGH, S.K. The ameliorative effects of silicone elemento on improvement of plants tolerance to diseases. **Scientia Agriculturae**, v. 8, n. 2, p. 80-85, 2014.

MOUSA, H. R.; ABDEL-AZIZ, S. M. Comparative response of drought tolerant and drought sensitive maize genotypes to water stress. **Australian Journal of Crop Science, Lismore**, v. 1, p. 31-36, 2008.

McCUE, P.; ZHENG, Z.; PINKHAM, J.; SHETTY, K. A model for enhanced pea seedling vigour following low pH and salicylic acid treatments. **Processes Biochemistry**, v.35, n.6, p.603-613, 2000.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidases in spinach chloroplast. **Plant and Cell Physiology**, v. 22, n.5, p. 867-880, 1981.

NASCIMENTO, S. P.; BASTOS, E. A.; ARAÚJO, E. C. E.; FREIRE FILHO, F. R.; SILVA, E. M. Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p.853-860, 2011.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; ALBUQUERQUE, M. B.; SILVA, E. C. Aspectos ecofisiológicos da tolerância à seca em plantas da caatinga. In: 2005.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; MORAES, J. A. P. V.; BURITY, H. A.; BEZERRA NETO, E. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, n. 1, p. 75-87, 2001.

PEI ZF, MING DF, LIU D, WAN GL, GENG XX, GONG HJ, ZHOU WJ. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **J Plant Growth Regul** v. 29, p. 106–115, 2010.

PEREIRA, L.B.; ARF, O.; SANTOS, N.C.B.; OLIVEIRA, A. E. Z.; KOMURO, L.K. Manejo da adubação na cultura do feijão em sistema de produção orgânico. **Pesquisas Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 29-38, 2015.

Perez-Perez, J. G., Robles, J. M., Tovar, J. C., and Botia, P. Response to drought and salt stress of lemon 'Fino 49' under field conditions: water relations, osmotic adjustment and gas exchange. **Sci Hortic.** n.122, p.83–90, 2009.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica, p. 191, 2004..

POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A. Manejo de doença de plantas com macro e micronutrientes, **Revista Brasileira de Fitopatologia**, v.28, p. 52-54, 2003.

RAIJ, B van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Agronômica Ceres/Potafós, p.343, 1991.

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**. 2007. 124p. (EPAMIG. Boletim Técnico, 82).

RODRIGUES, C. R.; RODRIGUES, T. M.; FIGUEIREDO, F. C. Aplicação de silício líquido solúvel via foliar em batata: Aumento de 5 toneladas/ha de batata extra. **Revista Campo e Negócios HF**, v.10, p. 66-70, 2007.

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.; CORREIA M. A. R. e SOUZA, H. A. Nutrição de plantas: Diagnose foliar em grandes culturas. p.301, 2008.

SABOYA, R.C.C.; BORGES, P.R.S.; SABOYA, L.M.F.; MONTEIRO, F.P.R.; SOUZA, S.E.A.; SANTOS, A.F.; SANTOS, E.R. Response of cowpea to inoculation with nitrogen-fixing strains in Gurupi-TO. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 4, p. 40-48, 2013.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. silicon management and sustainable rice production. *Advances in agronomy*, v. 58, p. 151 – 199, 1997.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; HEMINGSEN, E.A.; BRADSTREET, E.D. Hydrostatic pressure and osmotic potentials in leaves of mangroves and some other plants. **Proceedings of the National Academy Science**, v.51, p.119-125, 1965.

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, v.12, n.1, p.1-26, 2012.

SHEN, X., ZHOU, Y., DUAN, L., LI, Z., ENEJI, A.E., AND LI, J., Silicon effects on photosynthesis and antioxidante parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet\_B radiation, **J. Plant Physiol.**, vol. 167, p. 1248–1252, 2010.

SHI, Y., ZHANG, Y., HAN, W., FENG, R., HU, Y., GUO, J. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Front. Plant Sci.** 7: 196, 2016.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; YAO, H.; WU, J.; SUN, H.; GONG, H. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 78, p. 27-36, 2014.

SILVA, N.E.; RIBEIRO, R.V.; SILVA, LF.; VIEIRA, S.A.; PONTE, L.F.A.; SILVEIRA, J.A.G. Coordinate changes in photosynthesis; sugar accumulation and antioxidative enzymes improve the performance of *Jatropha curcas* plants under drought stress. **Biomass and Bioenergy**. 45: 270-279; 2012.

SOUZA, L.C.; SIQUEIRA, J.A.M.; SILVA, J.L.S.; SILVA, J.N.; COELHO, C.C.R.; NEVES, M.G.; OLIVEIRA NETO, C.F.; LOBATO, A.K.S. Compostos nitrogenados, proteínas e aminoácidos em milho sob diferentes níveis de silício e deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.13, n.2, p.117-128, 2014.

SHI, Y.; WANG, Y.; FLOWERS, T.J. et al. Silicon decreases chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions. **Journal of Plant Physiology**, v. 107, p. 847-853, 2013.

SRIPANYAKORN, S.; JUGDAOHSINGH, R.; THOMPSON, R. P. H.; POWELL, J. J. Dietary silicon and bone health. **Nutrition Bulletin**, v. 30, n. 3, p. 222-230, 2005.

SZABADOS, L.; SAVOURE, A. Proline: a multifunctional amino acid. **Trends Plant Science**, v.5, p.89-97, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4ª Ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

VALDEZ, V., BERGER, J.D.; WARKENTIN, T.; ASSENG, S.; RATNAKUMAR, P.; RAO, K.P.C.; GAUR, P.M.; MUNIER-JOLAIN, N.; LARMURE, A.; VOISIN, A.S.; SHARMA, H.; PANDE, S.; SHARMA, M.; KRISHNAMURTHY, L.; ZAMAN-ALLAH, M. Adaptation of grain legumes to climatic change: A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.32, p.31–44, 2012.

YANG, S. L., LAN, S. S., GONG, M. Hydrogen peroxide-induced proline and metabolic pathway of its accumulation in maize seedlings. **Journal Plant Physiology**, v. 166, p. 1694-1699, 2009.

ZUCCARINI, P. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress, **Biologia Plantarum**, v. 54, p. 157-160, 2008.

## APÊNDICE

**Tabela 3.** Resumo das análises de variância para as variáveis: Altura; TCA- taxa de crescimento absoluta; TEA- taxa de expansão absoluta; AFO- área foliar; MFT- massa fresca total da parte aérea;  $\Psi_w$ - potencial hídrico foliar SOD- superóxido dismutase; APX – ascorbato peroxidase; PRL- prolina;. Campina Grande, PB,2018.

<b>Quadrados médios</b>					
FV	<b>Altura</b>	<b>TCA</b>	<b>TEA</b>	<b>AFO</b>	<b>MFT</b>
<b>Gen</b>	10.189654*	0.010432*	0.004934*	11436.407705*	149.642723*
<b>Lam</b>	4.749796*	0.000071ns	0.000489ns	1963.752293ns	74.892316*
<b>Si</b>	3.877145*	0.018409*	0.005775*	29035.828144*	22.062193ns
<b>Gen*Lam</b>	8.586904*	0.006818ns	0.000946ns	3415.059159ns	12.295571ns
<b>Gen*Si</b>	8.568872*	0.008030*	0.001233ns	11638.996902*	25.153749ns
<b>Lam*Si</b>	0.608727ns	0.009645*	0.000436ns	33133.658464*	9.606764ns
<b>Gen*Lam*Si</b>	4.996879*	0.004110ns	0.000399ns	17239.434974*	17.147063ns
<b>Bloco</b>	14.500178*	0.039677*	0.000322ns	2525.899505ns	17.529508ns
<b>Resíduo</b>	0.281852	0.002767	0.001208	3826.187415	12.889203
<b>CV (%)</b>	5.51	20.93	85.20	28.74	34.25
FV	<b><math>\Psi_w</math></b>	<b>SOD</b>	<b>APX</b>	<b>PRL</b>	
<b>Gen</b>	0.250511*	0.012933ns	497.179466*	0.439704ns	
<b>Lam</b>	1.098253*	0.160100*	7089.849427*	4.966589*	
<b>Si</b>	0.006258ns	0.066598ns	1071.144526*	0.330840ns	
<b>Gen*Lam</b>	0.004396ns	0.172504*	45.782356ns	0.158203ns	
<b>Gen*Si</b>	0.113942*	0.031978ns	28.023632ns	0.213041ns	
<b>Lam*Si</b>	0.031211*	0.021584ns	1271.719632*	0.036940ns	
<b>Gen*Lam*Si</b>	0.061966*	0.037072ns	97.365423*	0.157340ns	
<b>Bloco</b>	0.217188*	0.115042*	17.298307ns	0.476468*	
<b>Resíduo</b>	0.007161	0.026729	26.283099	0.112102	
<b>CV (%)</b>	14.01	18.33	25.68	67.59	

ns- não significativo; \*- significativo.