



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

JUCELINO DE SOUSA LIMA

**SILÍCIO NO CRESCIMENTO, STATUS HIDRÍCO E OSMOPROTEÇÃO DE MUDAS
DE MAMOEIRO CULTIVADO SOB SUPRESSÃO HÍDRICA**

CAMPINA GRANDE – PB

2020

JUCELINO DE SOUSA LIMA

**SILÍCIO NO CRESCIMENTO, STATUS HIDRÍCO E OSMOPROTEÇÃO DE MUDAS
DE MAMOEIRO CULTIVADO SOB SUPRESSÃO HÍDRICO**

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. Josemir Moura Maia

Coorientador: Prof. Dr. Alberto Soares de Melo

CAMPINA GRANDE-PB

2020

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.

L732s Lima, Jucelino de Sousa.
Sílicio no crescimento, status hídrico e osmoproteção de mudas de mamoeiro cultivado sob supressão hídrica [manuscrito] / Jucelino de Sousa Lima. - 2020.
40 p.
Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Estadual da Paraíba, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, 2020.
"Orientação : Prof. Dr. Josemir Moura Maia, Departamento de Agrárias e Exatas - CCHA."
1. Carica papaya L.. 2. Osmorregulação. 3. Escassez hídrica. I. Título

21. ed. CDD 634.651

JUCELINO DE SOUSA LIMA

**SILÍCIO NO CRESCIMENTO, STATUS HIDRÍCO E OSMOPROTEÇÃO DE MUDAS
DE MAMOEIRO CULTIVADO SOB SUPRESSÃO HÍDRICO**

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 05 de fevereiro de 2020

BANCA EXAMINADORA



Prof. Josemir Moura Maia (D. Sc., Bioquímica) – UEPB
Orientador



Prof.ª. Liziane Maria (D. Sc., Biologia Vegetal) – Embrapa algodão



Prof. Rener Luciano de Souza Ferraz (D. Sc., Engenharia Agrícola) – UFCG

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida, pela força me dada para chegar até aqui, por tudo que consegui e ainda vou conquistar.

Agradeço à minha mãe que infelizmente não está aqui para compartilhar comigo este momento, mas foi a principal responsável por eu ter conseguido chegar até aqui, sempre me apoiando em todos os momentos, compartilhando sonhos comigo e me fazendo ser quem eu sou hoje.

À minha família que sempre está ao meu lado ajudando e caminhando junto comigo, sem medir esforços.

À minha tia Maria José que vem sendo praticamente a minha segunda mãe, me dando forças para seguir em frente.

À minha avó Maria Nice e meu tio Marcondes que me acolheram de braços abertos com todo amor e carinho.

Ao meu padrasto Nereu Ferreira que está sempre me ajudando, que além de ser um grande amigo, se tornou um pai para mim.

A minha prima/irmã Maria Fernanda, meu primo Alan Douglas e minha tia Giurlene, que me acolheram durante um ano em Campina Grande, para que eu pudesse estudar, sempre com muito amor, carinho e companheirismo, algo que levarei para toda minha vida.

Ao meu Orientador e amigo Josemir Moura Maia, que sempre esteve do meu lado desde a graduação, me orientando e incentivando da melhor maneira possível.

À Anna Beatriz Andrade a quem eu tenho uma enorme admiração e que esteve do meu lado nos melhores dias da minha vida e no momento mais difícil, me dando força e colo junto com a sua família para que eu não desistisse e chegasse até aqui.

À todos os meus amigos, em especial Jeimison Caetano, Carlos Eduardo, Anselmo Ferreira, Gean Carlos e Edson Lucas Almeida que se tornaram irmãos para mim e que sempre estão comigo em todas as ocasiões da minha vida.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e amizade durante o tempo que passamos juntos.

Ao LAPROV e todos os integrantes que me ajudaram na minha pesquisa e pela boa convivência de todos os dias.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, a Universidade Estadual da Paraíba e todos os profissionais envolvidos pela oportunidade de viver essa experiência única e incrível.

À CAPES pela bolsa concedida durante o curso.

Ao Departamento de Agrárias e Exatas da UEPB-Campus IV pelo acolhimento durante o meu estágio de ensino.

Dedico esse trabalho a minha família e aos meus amigos, que sempre estiveram comigo, com muito amor e carinho, me apoiando para que eu pudesse conseguir finalizar esta etapa da minha vida.

*Ofereço esse trabalho em especial a minha mãe, pois, “Tudo aquilo que sou e pretendo ser, devo a um anjo, minha mãe.”
TE AMO!*

Abraham Lincoln

RESUMO

LIMA, JUCELINO SOUSA. Universidade Estadual da Paraíba/Embrapa Algodão, fevereiro, 2020. Silício no crescimento, status hídrico e osmoproteção em mudas de mamoeiro cultivado sob supressão hídrica. Campina Grande, PB, 2019. Pg. 45. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias). Orientador: Prof. Dr. Josemir Moura Maia.

O mamão (*Carica papaya* L.) é uma das principais frutas cultivadas no Brasil, sendo uma cultura de clima tropical e subtropical. O país se destaca como o segundo maior produtor e exportador desse fruto, com grande destaque para a produção na região Nordeste. Um dos principais fatores limitantes da produtividade dessa cultura na Região é a irregularidade das chuvas. É fundamental, portanto, viabilizar meios alternativos de minimizar danos ou induzir a tolerância ao déficit hídrico, como por meio de compostos atenuadores de estresses como o silício (Si). Entre os muitos benefícios deste micronutriente com relação a indução de resistência ao estresse hídrico, destaca-se os estímulos a mecanismos osmorregulatórios, que são promovidos através do aumento nos conteúdos de osmólitos compatíveis no citosol, além de aumento no status hídrico e crescimento. Para verificar a eficácia do Si na promoção da resistência ao estresse hídrico em mamoeiro, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito desse elemento como atenuador avaliando o crescimento, status hídrico e osmorregulação de mudas. O trabalho foi realizado no Campus IV da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), localizado no município de Catolé do Rocha. Foram testadas cinco concentrações de dióxido de silício (0; 2; 3; 4 mmol L⁻¹) e três níveis de disponibilidade de água no solo (40, 60 e 80% da capacidade de campo aplicada em vasos), com 5 repetições, perfazendo 120 unidades experimentais. As mudas foram submetidas a 30 dias de estresse, começando a partir dos 45 dias após a emergência. Aos 75 dias após a emergência foram mensuradas as variáveis de crescimento e status hídrico, bem como a coleta do material para as avaliações dos osmólitos. As doses de Si influenciaram positivamente à altura das mudas, diâmetro do caule e volume radicular do mamoeiro. O Si também promoveu melhorias no status hídrico foliar, na concentração foliar de açúcares solúveis totais e aminoácidos livres totais, porém não influenciou nas características bioquímicas da raiz de mudas de mamoeiro. 4 mmol L⁻¹ de Si foi a dose que promoveu melhor desempenho das mudas de mamoeiro submetidas a déficit hídrico. O aumento no status hídrico foliar, na concentração de açúcares solúveis totais e aminoácidos livres totais foliar promoveu maior crescimento de plantas de mamoeiro.

Palavras Chave: *Carica papaya* (L.). Osmorregulação. Escassez hídrica.

ABSTRACT

LIMA, JUCELINO SOUSA. State University of Paraíba / Embrapa algodão, February, 2020. Action of silicon on growth, status hydric and osmoprotection in papaya seedlings grown under water suppression. Campina Grande, PB, 2019. Pg. 45. Dissertation (Graduate Program in Agricultural Sciences). Advisor: Prof. Dsc. Josemir Moura Maia.

Papaya (*Carica papaya* L.) is one of the main fruits grown in Brazil, being a culture of tropical and subtropical climate. The country stands out as the second largest producer and exporter of this fruit, with great emphasis on production in the Northeast region. One of the main factors limiting the productivity of this crop in the Region is the irregular rainfall. It is essential, therefore, to make possible alternative means of minimizing damage or inducing tolerance to water deficit, such as through stress-reducing compounds such as silicon (Si). Among the many benefits of this micronutrient in relation to the induction of resistance to water stress, we highlight the stimuli to osmoregulatory mechanisms, which are promoted by increasing the content of compatible osmolytes in the cytosol, in addition to increasing water status and growth. To verify the effectiveness of Si in promoting resistance to water stress in papaya, the present study aimed to evaluate the effect of this element as an attenuator by evaluating seedling growth, water status and osmoregulation. The work was carried out at Campus IV of the State University of Paraíba (UEPB), located in the municipality of Catolé do Rocha. Five concentrations of silicon dioxide (0; 2; 3; 4 mmol L⁻¹) and three levels of soil water availability (40, 60 and 80% of the field capacity applied in pots) were tested, with 5 replicates, making 120 experimental units. The seedlings were subjected to 30 days of stress, starting from 45 days after emergence. At 75 days after emergence, the variables of growth and water status were measured, as well as the collection of material for the evaluation of osmolytes. The doses of Si positively influenced the height of the seedlings, stem diameter and root volume of papaya. Si also promoted improvements in leaf water status, in the leaf concentration of total soluble sugars and total free amino acids, but it did not influence the biochemical characteristics of the papaya seedling root. 4 mmol L⁻¹ of Si was the dose that promoted the best performance of papaya seedlings submitted to water deficit. The increase in leaf water status, in the concentration of total soluble sugars and total free leaf amino acids promoted greater growth of papaya plants.

Keywords: *Carica papaya* (L.). Osmoregulation. Water scarcity

LISTA DE FIGURA

| | | |
|------------------|---|----|
| Figura 1. | Matriz de correlação de Pearson de mudas de mamoeiro suplementadas com silício e cultivadas com diferentes lâminas de água..... | 28 |
| Figura 2. | Altura da planta (A), diâmetro do caule (B) e volume radicular (C) de mudas de mamoeiro suplementadas com silício e cultivadas com diferentes lâminas de água..... | 30 |
| Figura 3. | Conteúdo relativo de água foliar (A), Percentual de umidade foliar (B), conteúdo relativo de água da raiz (C) e Percentual de umidade da raiz de mudas de mamoeiro suplementadas com silício e cultivadas com diferentes lâminas de água..... | 32 |
| Figura 4. | Açúcares solúveis totais da folha (A), açúcares solúveis totais da raiz (B) de mudas de mamoeiro suplementadas com silício e cultivadas com diferentes lâminas de água..... | 33 |
| Figura 5. | Aminoácidos livres totais em folha (A) e aminoácidos livres totais em raiz (B) de mudas de mamoeiro suplementadas com silício e cultivadas com diferentes lâminas de água..... | 34 |
| Figura 6. | Prolina em folha (A) e prolina em raiz (B) de mudas de mamoeiro suplementadas com silício e cultivadas com diferentes lâminas de água..... | 35 |

LISTA DE ABREVIACÃO

| | |
|---------------|--|
| AST | Açúcares solúveis totais |
| AALT | Aminoácidos livres totais |
| VR | Volume radicular |
| AP | Altura da planta |
| DC | Diâmetro do caule |
| PRO | Prolina |
| CC | Capacidade de campo |
| pH | Potencial de hidrogênio |
| DAE | Dias após a emergência |
| Si | Silício |
| MF | Massa fresca |
| LAPROV | Laboratório de Tecnologias da Produção Vegetal |
| DIC | Delineamento inteiramente casualizado |
| UEPB | Universidade Estadual da Paraíba |
| PCA | Análise de componentes principais |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 13 |
| 2.1 Aspectos botânicos da cultura do mamão | 13 |
| 2.2 O mamoeiro e sua importância econômica | 13 |
| 2.3 Condições de cultivo | 14 |
| 2.4 Comportamento fisiológico e metabólico de plantas sob déficit hídrico | 14 |
| 2.5 Mecanismos de osmoproteção em plantas | 16 |
| 2.6 Importância do silício (Si) para a agricultura | 16 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 19 |
| 3.1 Caracterização do local da pesquisa | 19 |
| 3.2 Tratamentos e delineamento estatístico | 19 |
| 3.3 Instalação e condução do experimento | 19 |
| 3.4 Variáveis relacionadas ao crescimento | 20 |
| 3.5 Variáveis relacionadas ao status hídrico | 20 |
| 3.6 Variáveis relacionadas ao metabolismo osmótico | 20 |
| 3.6.1 Açúcares solúveis totais – AST | 20 |
| 3.6.2 Aminoácidos livres totais | 21 |
| 3.6.3 Prolina | 21 |
| 3.7 Análise estatística | 21 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 22 |
| 5. CONCLUSÕES | 31 |
| 6. REFERÊNCIAS | 32 |

1. INTRODUÇÃO

O mamão (*Carica papaya* L.) é um dos frutos mais cultivados e consumidos em regiões tropicais e subtropicais do mundo, devido ao seu aroma e sabor agradáveis, além de alto valor nutricional (rico em cálcio, magnésio, potássio, vitaminas C e E) (VIANA et al., 2015). No Brasil, a produção de mamão chega a 1.057.101 toneladas com uma produtividade média de 48,33 t ha⁻¹ (IBGE, 2017), havendo destaque no estado da Paraíba, que aparece como o sexto produtor, com produção em torno de 36.924 t numa área colhida de 979 t ha⁻¹ (IBGE, 2017).

Porém, existem muitos fatores que limitam a produção dessa cultura no semiárido, pois nesses ambientes as plantas podem enfrentar várias condições adversas isoladamente ou combinadas (alta insolação, altas temperaturas, baixa pluviosidade, entre outros. Dentre elas, o déficit hídrico, devido à limitada disponibilidade de água e/ou quando a taxa evapotranspiratória torna-se excessiva, é a principal. Para Taiz et al. (2017) a água é o principal constituinte das plantas e uma pequena redução na disponibilidade de água no solo pode afetar drasticamente seu metabolismo, provocando efeitos como a restrição na aquisição de nutrientes, limitações no crescimento e produção.

Entretanto, as plantas podem acionar mecanismos de tolerância ao déficit hídrico que visam a proteção contra danos celulares quando o estresse se torna mais severo. A habilidade de algumas espécies ou cultivares de ajustar osmoticamente suas células em condições de déficit hídrico, ativando o mecanismo de acumulação de solutos compatíveis, é uma resposta bioquímica-fisiológica que melhora a absorção de água pela planta, garantindo manutenção do status hídrico, crescimento e funcionalidade das demais atividades metabólicas (ZHANG et al., 2014; ANJUM et al., 2017). Dentre esses compostos, a prolina e a glicina betaína, tem recebido bastante destaque em plantas submetidas a condições de deficiência hídrica (AJITHKUMAR e PANNEERSELVAM, 2014; SIDDIQUI et al., 2015).

Pode-se ressaltar ainda a possibilidade da atenuação do déficit hídrico através da aplicação exógena de alguns outros elementos, como o Si. O Si pode agir de uma forma física através da sua deposição nas estruturas celulares das plantas, em que se melhora as características de fototropismo, mantendo a lâmina da folha ereta, melhorando a interceptação de luz o que, conseqüentemente, potencializa a capacidade fotossintética. Além disso a biosilificação acarreta na formação de uma barreira de sílica amorfa, nos tecidos da epiderme logo abaixo da cutícula, mais precisamente nas paredes celulares mais externas formando uma dupla camada de sílica-celulose, o que pode ajudar a aliviar o estresse biótico e abiótico,

dificultando a infecção por patógenos, reduzindo a transpiração e promovendo melhorias no status hídrico (EXLEY, 2015; GUERRIERO et al., 2016; PARISA SHARIFI, 2017).

Em plantas de sorgo, por exemplo, o Si aumentou a condutância hidráulica, a transpiração, a condutância estomática e o teor de água nas folhas sob estresse osmótico (LIU et al., 2014; LIU et al., 2015). Esse aumento da condutância hidráulica da raiz coincidiu com uma expressão aumentada de aquaporina proteína intrínseca da membrana plasmática (PIP), e o aumento do transporte de água mediado pela PIP foi sugerido pela inibição do fluxo de água pelo mercúrio (Hg^{2+}) (LIU et al., 2014; LIU et al., 2015; ZHU et al., 2015). Contudo, os mecanismos pelos quais a nutrição do Si afeta a expressão e a atividade da aquaporina ainda não foram esclarecidos.

Além de afetar a condutância hidráulica e o transporte de água pela possível modulação da expressão/atividade de aquaporina, o Si pode afetar o transporte de água ajustando o potencial osmótico das células através do aumento da acumulação de osmólitos (por exemplo, prolina, açúcares solúveis, íons inorgânicos, entre outros) (SONOBE et al., 2010; MING et al., 2012). Condutância hidráulica radicular aumentada também pode ser atribuída a reduções induzidas por Si no estresse oxidativo e nos danos à membrana (SHI et al., 2016)

Vários autores já relataram a eficiência da aplicação de Si na manutenção do status hídrico em diversas culturas, incluindo sorgo (AHMED et al., 2014), milho (AMIN et al., 2014), arroz (MING et al., 2012), canola (HABIBI, 2014) e tomate (SHI et al., 2016). Sendo a deficiência hídrica um fator limitante ao crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas agrícolas (MELO et al., 2010). Objetivou-se com o presente estudo avaliar a ação do Si com relação ao crescimento, status hídrico e osmorregulação de mudas de mamoeiro submetidas a condições de déficit hídrico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos botânicos da cultura do mamão

O mamoeiro pertence à classe Eudicotyledoneae, subclasse Archichlamydeae, ordem Violales, subordem Caricineae, família Caricaceae, com seis gêneros, *Jacaratia*, *Vasconcelea*, *Horovitzia*, *Jarrila*, *Cilycomorpha* e *Carica* que contém 35 espécies (RAMOS et al., 2012). Lorenzi et al. (2006) descrevem o mamoeiro como uma planta tipicamente tropical, lactescente, de tronco oco, não lenhoso (herbáceo), de 3 a 6 m de altura, ereto, podendo atingir até 8 metros, encimado por uma coroa de folhas. Sendo essas alternadas, grandes, com 20 a 60 cm de comprimento, com pecíolo também oco.

O sistema radicular é pivotante, com uma raiz principal muito desenvolvida. As flores do mamoeiro podem ser divididas basicamente em três tipos bem diferenciados: flor pistilada ou feminina típica, flor hermafrodita e flor estaminada ou masculina típica. O fruto é uma baga de forma variável de acordo com o tipo de flor, podendo ser arredondado, oblongo, cilíndrico e piriforme, sendo sua casca fina e lisa, de coloração entre o amarelo-claro e o alaranjado, protegendo uma polpa com 2,5 a 5 cm de espessura e de coloração que pode variar de amarela a avermelhada (LIMA et al., 2018).

2.2 O mamoeiro importância econômica e social

Em 2014 a mamonicultura no Brasil gerou uma renda de R\$ 1,2 bilhões, apesar da redução de 0,7% na área cultivada, devido a problemas de viroses e altos custos de produção (REETZ et al., 2015). Como o mercado externo é bem receptivo ao mamão brasileiro a curto e médio prazo, além da vantagem cambial, que nos torna ainda mais competitivos frente a outros produtores internacionais deste fruto, houve crescimento na exportação no ano de 2015 (BRAPEX, 2015). Ressaltando assim a importância nutricional e social considerável na geração de emprego e renda no Brasil (GALO et al., 2014).

Entre as frutas da pauta de exportação brasileira de 2017, o mamão está entre as sete primeiras, com uma participação de 4,45% (ANUAL BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2018). O mamão é um fruto muito consumida devido às características benéficas que possui, apresentando vitaminas A, C e do complexo B, e possui sais minerais, tais como ferro, cálcio e fósforo, além do seu valor energético, que oferece em média 50 kcal/100g, além de ser muito saboroso (STORCKL et al., 2013).

Segundo Ferreira (2005) dentre as alternativas naturais, utilizadas no processo de cicatrização encontra-se a Papaína, que é uma mistura de enzimas proteolíticas e peroxidases existentes no látex do mamoeiro. Conforme descrito por Leite et al. (2012) o tecido necrótico e os fragmentos celulares presentes na ferida retardam o processo de cicatrização, e por essa razão a proteólise é de extrema importância. Sendo assim amplamente usado nas indústrias farmacêuticas para confecção de produtos cicatrizantes.

2.3 Condições de cultivo

O solo para o cultivo do mamoeiro tem como principais exigências a permeabilidade do perfil e uma localização no relevo que permita a drenagem (SOUZA et al., 2016). Solos próximos da saturação causam o fechamento lento dos estômatos, que demoram até nove dias para fechar completamente, o que provoca uma série de danos à planta (CAMPOSTRINI e GLENN, 2007). No entanto, quando o solo seca, o mamoeiro também demora a fechar os estômatos e transpira durante algum tempo, como se houvesse água disponível, assim os estômatos não são eficientes na resposta às variações de umidade do solo, pois não ativam os sistemas morfológicos ou fisiológicos para controlar o excesso ou a falta de água (MARLER et al., 1994).

O mamoeiro também exige cuidados quanto à parte aérea, pois alterações de temperatura, luminosidade, umidade relativa do ar e altitude podem acarretar prejuízos no período de desenvolvimento da planta e na formação dos frutos (CAMPOSTRINI e GLEEN, 2007). De acordo com Manica et al. (2006), regiões de cultivo com temperaturas na faixa de 22 a 27 °C são consideradas excelentes para o rápido desenvolvimento vegetativo, a precocidade de florescimento e a colheita dos primeiros frutos, os quais apresentam excelente sabor, altos teores de sólidos solúveis e produtividades elevadas.

Essa cultura é muito exigente em água, tanto à falta quanto ao excesso. Dessa forma, em regiões onde existem veranicos prolongados, a cultura não apresenta rendimentos satisfatórios, tornando obrigatório o uso da irrigação (SILVA e COELHO, 2003). Por ser uma planta exigente em água, atribui-se ao mamoeiro um consumo que pode variar entre 1.200 e 3.125 mm, por ano, dependendo das condições climáticas (COELHO, 2003).

2.4 Comportamento fisiológico e metabólico de plantas sob déficit hídrico

A deficiência hídrica seja ela permanente ou temporária, promove nas plantas uma série de respostas com a percepção do estresse, emitindo inúmeras alterações, sendo elas, fisiológicas, metabólicas e morfológicas (QUEIROZ, 2010). Desta maneira, as plantas desenvolvem mecanismos de defesas adaptativos às condições de estresse que resultam em ajustes morfológicos, anatômicos, celulares, bioquímicos e moleculares, podendo variar de acordo com a espécie, estágio de desenvolvimento da planta, tipo de estresse e intensidade do mesmo (LISAR et al., 2012).

Uma das modificações que ocorre nas plantas sob condições de estresse, principalmente deficiência hídrica, é o desenvolvimento do sistema radicular mais profundo para se obter mais água, uma vez que a taxa de secagem é maior nas camadas superficiais do solo do que nas mais profundas, além da planta sofrer alterações no crescimento, que por sua vez depende da divisão e expansão de suas células, sendo esta última condicionada à pressão de turgência, processo afetado pela baixa disponibilidade de água no solo ou pelo excesso de transpiração (ALSINA et al., 2010).

Além disso a diminuição da disponibilidade hídrica no solo causa redução significativa no potencial hídrico da folha e na transpiração que, por sua vez, afetam a absorção de nutrientes (FAHAD et al., 2017). Essas restrições também tornam as plantas mais suscetíveis a danos causados por fótons como é o caso da foto-oxidação, aumentando as espécies reativas de oxigênio (EROs), que podem danificar a membrana celular e outras moléculas vitais, como DNA, lipídios e proteínas (FAHAD et al., 2017). Esse excesso de luz promovido pelo déficit hídrico ocasiona em regulação negativa de genes relacionados à fotossíntese e à redução da disponibilidade de CO₂ (OSAKABE et al., 2014).

As respostas das plantas ao déficit hídrico relacionadas a fotossíntese se iniciam com a redução da condutância estomática (gs), que por sua vez, reduz a concentração interna de gás carbônico (Ci), bem como a atividade de carboxilação da enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), havendo assim queda considerável no processo fotossintético (XU et al., 2010). Em alguns estudos, a diminuição da fotossíntese foi relacionada ao fechamento estomático e aumento da resistência à difusão de CO₂ (XU et al., 2010; FLEXAS et al., 2012; PEREZ-MARTIN et al., 2014). Sob estresse hídrico, o ácido abscísico (ABA) acumula-se no apoplasto foliar e induz o fechamento estomático (RODRIGUES et al., 2017).

Conjuntamente, a produção de fotoassimilados é reduzida, fazendo com que as plantas consumam suas reservas de carboidratos (aumentam os açúcares solúveis em razão da quebra de amido) a fim de suprir a falta de energia e obter compostos osmorreguladores (SINGH et al., 2015). A obtenção de solutos osmorreguladores é um dos mecanismos fisiológicos mais eficazes

na manutenção da turgescência celular, quando a planta se encontra em ambiente com baixo potencial de água no solo e por curtos períodos de tempo (MONTEIRO et al., 2014).

2.5 Mecanismos de osmoproteção em plantas

Uma das principais respostas fisiológicas/moleculares ao déficit hídrico em plantas é a habilidade de algumas espécies em ajustar osmoticamente suas células sendo um dos mecanismos fisiológicos mais eficazes para a manutenção da turgescência celular, sob condições de baixo potencial hídrico no solo (MARIJUAN E BOSCH, 2013). Esse mecanismo se dá através do acúmulo, no vacúolo ou no citosol, de solutos compatíveis (prolina, glicina betaína, trealose, sacarose, poliaminas, manitol, pinitol, entre outros) que contribuem para a manutenção do equilíbrio hídrico, prevenção das plantas contra a desidratação nociva e preservação da integridade de proteínas, enzimas e membranas celulares (ASHRAF et al., 2011; MARIJUAN e BOSCH, 2013).

Alguns desses solutos também têm função osmoprotetora como é o caso da prolina, pode atuar ainda contra subprodutos tóxicos do metabolismo resultantes do estresse hídrico, como é o caso das EROs (MONTEIRO et al., 2014). O aminoácido prolina é o soluto mais estudado, em razão da sua sensibilidade em resposta a condições de estresse, incluindo o estresse hídrico (ASHRAF et al., 2011). Plantas sob estresse abiótico, o conteúdo de prolina pode aumentar em até 100 vezes, em comparação ao observado em plantas cultivadas sob condições ideais (VERBRUGGEN e HERMANS, 2008).

As análises bioquímicas referentes a avaliação desses osmólitos compatíveis, tais como a glicina betaína, prolina e alguns carboidratos, têm sido propostas como úteis para se identificar plantas potencialmente tolerantes à seca (BOWNE et al., 2012; MWADZINGENI et al., 2016). Existe considerável variação, entre diferentes culturas, na capacidade de ajuste osmótico e isso deve ser considerado ao se medir a habilidade da cultura em suportar o déficit hídrico (MORANDO et al., 2014).

2.6 Importância do silício (Si) para a agricultura

O silício é o segundo elemento mais abundante do solo após o oxigênio, compreendendo 29% da crosta terrestre (HAYNES, 2014). Devido a sua afinidade com o oxigênio é encontrado na natureza na forma de sílica (SiO_2) ou silicatos, que são ligados quimicamente a diversos metais (SAVVAS e NTATSI, 2015), sendo absorvido pelas plantas na solução do solo como

ácido silícico $\text{Si}(\text{OH})_4$ via canais do tipo aquaporina (proteínas intrínsecas do tipo Nod26, NIPs) (GRÉGOIRE et al., 2012; DESHMUKH et al., 2013).

Ao precipitar como SiO_2 e ser incorporado em estruturas biológicas (por exemplo, a parede celular) exerce sua ação protetora através da formação de uma barreira física, sendo que este papel ainda não é bem compreendido e não explica por que as plantas suplementadas com Si são mais adequadas para enfrentar tensões exógenas (LUYCKX et al., 2017). Sabe-se, contudo, que esse elemento pode contribuir para a melhoria da capacidade produtiva dos cultivos, amenizando diferentes estresses, seja abiótico ou biótico, proporcionando melhores condições de desenvolvimento para a espécie (CHEN et al., 2011; MARAFON e ENDRES, 2013).

A literatura tem descrito que o uso do silício também é capaz de melhorar a arquitetura dos vegetais e criar resistência das plantas contra alguns insetos, devido a barreiras físicas, químicas e estruturais. Esse acréscimo da espessura da barreira física aumenta a dificuldade de penetração do inseto, diminui a sobrevivência do mesmo e isso leva a uma diminuição da suscetibilidade (KORNDÖRFER et al., 2011). Essa estabilidade estrutural melhorada tem sido atribuída à ligação do Si com a hemicelulose da parede celular (HE et al., 2013; HE et al., 2015; MA et al., 2015), como foi observado em cultura de suspensão de células de arroz (HE et al., 2015). Tais propriedades modificadas da parede celular resultantes da deposição de Si em folhas, pode ser capaz de reduzir a condutância estomática, bem como a transpiração, garantindo manutenção do status hídrico da planta (ZHU e GONG, 2014).

Entretanto, existem alguns relatos conflitantes na literatura sobre o impacto do Si. Liu e Guo (2013) avaliaram as características fisiológicas da alfafa sob condições de estresse hídrico, evidenciaram que a aplicação de Si reduziu tanto a taxa de transpiração quanto a condutância estomática, mas não teve efeito sobre a taxa fotossintética. Em contraste, os resultados encontrados por Chen et al. (2011) e Ming et al. (2012) mostraram que a transpiração foliar do arroz foi aumentada pelo Si quando as plantas estavam passando por seca.

Já Hattori et al. (2005) estudando plantas de sorgo suplementadas com Si em condições de seca, notaram aumento na capacidade fotossintética, transpiração e condutância estomática, e relacionaram isso a melhorias na extração de água do solo, como consequência da promoção do alongamento da raiz relacionada com Si. Pode-se citar também a regulação positiva dos genes da aquaporina devido a suplementação de Si (Liu et al., 2015).

Dentre os muitos benefícios proporcionados por este elemento, Rodrigues et al. (2011) ressaltaram ainda que os ânions silicatos aumentam o pH do solo, podendo fazer com que a atividade dos elementos tóxicos seja diminuída, precipitando-os em compostos insolúveis ou formando polímeros de baixa disponibilidade para a planta. Com o alumínio, por exemplo,

podem formar hidroxialuminossilicatos (HAS) que reduzem a toxicidade de alumínio em solos ácidos. Enquanto Chen et al. (2016) relataram que o suplemento com H_2SiO_3 na solução nutritiva alivia a deficiência de K, o que também causa desidratação do tecido.

Apesar de não ser ainda amplamente utilizada pelos agricultores brasileiros, à adubação silicatada tem sido referida como uma tecnologia promissora para reduzir os efeitos negativos dos fatores que causam estresse nas plantas incluindo o estresse hídrico, aumentando a produtividade das culturas (MA e YAMAJI, 2006). Em termos gerais, as plantas consistem em um número diverso de *regulons* que respondem ao estresse, por exemplo, a proteína de ligação ao elemento responsivo à desidratação (DREB2) é desencadeada pela temperatura e pelo estresse hídrico (MIZOI et al., 2012). Segundo Khattab et al. (2014), em arroz a adição de Si resultou na regulação positiva de fatores de transcrição envolvidos na expressão de DREB2A.

Além das vantagens mencionadas acima, outros autores relataram que a suplementação com Si pode promover melhoria do crescimento e desenvolvimento (ZHANG et al., 2015), tolerância a estresse abiótico e biótico (MUNEER et al., 2014), manejo de macro e micronutrientes (TRIPATHI et al., 2014).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local da pesquisa

O trabalho foi realizado no Setor Experimental do Laboratório de Tecnologias da Produção Vegetal da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), localizado no município de Catolé do Rocha -PB. A cidade está situada a 6° 21' de latitude S e 37° 48' de longitude W. O clima da região é do tipo BSw'h', segundo classificação de Köppen, caracterizando-se por ser semiárido quente, com duas estações distintas, uma chuvosa com precipitação irregular e outra sem precipitação. A precipitação média anual é de 870 mm, temperatura média de 27 °C com período chuvoso concentrando-se entre os meses de fevereiro a abril.

3.2 Tratamentos e delineamento estatístico

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com tratamentos combinados no esquema fatorial 4x3, sendo quatro concentrações de dióxido de Si (0; 2; 3; 4 mmol L⁻¹) de acordo com Silva Junior (2018), aplicados via foliar, pela manhã, e três níveis de disponibilidade de água no solo: 40, 60 e 80% da capacidade de campo aplicada em vasos (CC), com 5 repetições, sendo utilizado 2 plantas úteis por parcela, perfazendo 120 unidades experimentais.

3.3 Instalação e condução do experimento

Para a semeadura utilizou-se sementes de mamão da cultivar Havaí, com taxa de germinação de 74% e pureza de 99,9% da marca comercial ISLA[®]. O semeio foi realizado em vasos com capacidade de 8 litros, sendo o mesmo composto por 50% de areia lavada de rio + 50% de vermiculita. Para fins de tratamento foi utilizado o Dióxido de Si (SiO₂) (Si: 100%) realizando a aplicação por meio de borrifação sobre a superfície adaxial das folhas até o ponto de escorrimento como descrito por Silva Junior (2018).

A primeira aplicação do Si foi realizada aos 15 dias após a emergência (DAE) como pré-condicionamento das plântulas a irrigação deficitária, que foi iniciada aos 45 DAE, juntamente com a segunda aplicação do Si. As demais aplicações foram realizadas a cada seis dias, até os 69 DAE, totalizando 5 aplicações de Si. Aos 75 DAE foram mensuradas as variáveis de crescimento e coletado o material para avaliações bioquímicas.

A irrigação foi realizada com água deionizada com condutividade elétrica de $0,01 \text{ dS m}^{-1}$, e com base na massa de água evaporada, estimada por meio da pesagem de vasos específicos para se aferir a evaporação, aplicando-se a lâmina de 80% da CC até o 45º DAE, logo após fazendo-se a diferenciação dos níveis de água.

3.4 Variáveis relacionadas ao crescimento

A altura das plantas (AP) foi mensurada com auxílio de uma régua graduada, enquanto para o diâmetro do caule (DC) utilizou-se de um paquímetro digital, medindo-se a um centímetro do solo. O volume do sistema radicular (VR) foi obtido pelo deslocamento da coluna de água na proveta (SANT'ANA et al., 2003), onde colocou-se um volume de 50 ml de água na proveta e logo após introduziu-se a raiz, observando o movimento da coluna de água em mL, que corresponde ao volume da raiz em mm^3 .

3.5 Variáveis relacionadas ao status hídrico

Para avaliar o Conteúdo Relativo de Água (CRA) foi utilizada a metodologia descrita por Slavick (1974). O conteúdo relativo de água foi calculado através da fórmula: $[(MF-MS) \div (MT-MS)] * 100$ e expressos em porcentagem, onde:

MF = Matéria fresca

MS = Matéria seca

MT = Matéria turgida.

O Percentual de Umidade (U%) foi calculado através da fórmula $[(MF-MS) \div MF] * 100$ e expresso em porcentagem.

3.6 Variáveis relacionadas ao metabolismo osmótico

3.6.1 Açúcares solúveis totais – (AST)

A determinação do conteúdo de carboidratos foi realizada segundo protocolo de Dubois et al. (1956). Para extração transferiu-se 500 mg de massa fresca para tubos de ensaio de 15 mL com tampa rosqueável, em seguida foram adicionados 5 mL de etanol a 80% e os tubos incubado a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 hora. Passado esse tempo, o sobrenadante foi coletado e filtrado através de algodão. Para a mensuração foi aplicado 0,5 mL do extrato em tubo de ensaio e adicionado 0,5

mL de fenol 5% e 2,5 mL de ácido sulfúrico. A determinação de AST foi realizada em espectrofotômetro a 490 nm e a concentração foi estimada através da curva padrão de glicose na unidade mg g^{-1} de massa fresca (MF).

3.6.2 Aminoácidos livres totais – (AALT)

Para a extração de aminoácidos foi utilizado o mesmo extrato utilizado na determinação de açúcares totais. Para a mensuração foram adicionados 100 μL da amostra ao tubo de ensaio contendo 250 μL de tampão citrato 0,2 M, pH 5,0 + 250 μL de reagente ninhidrina (YEMM e COCKING, 1955). A reação foi misturada em vortex e depois conduzida a banho-maria de 10 a 15 minutos a 100 °C. Quando a amostra atingiu a temperatura ambiente, realizou-se a leitura em espectrofotômetro a 570 nm (YEMM e COCKING, 1955). As concentrações de AALT foram determinadas com base na curva padrão ajustada a partir de concentrações crescentes de uma mistura padronizada de L-Glutamina, com seus resultados expressos em $\mu\text{mol. g}^{-1}$ de MF.

3.6.3 Prolina – (PRO)

A prolina livre da parte aérea e das raízes foi determinada de acordo com Bates et al. (1973). Em tubos de ensaio foram adicionadas alíquotas de 1 mL do extrato, mais 1 mL do reagente ninhidrina ácida e mais 1 mL de ácido acético glacial (98%). Após a homogeneização, os tubos foram hermeticamente fechados e levados ao banho maria por 1 hora a 100 °C. Logo após a reação foi interrompida com banho de gelo. Em seguida foram adicionados 2 mL de tolueno e misturados vigorosamente com um agitador durante 10-15 segundos. O cromóforo foi coletado e realizada a leitura em absorvância de 520 nm. A concentração de PRO ($\mu\text{g. g}^{-1}$ MF) foi determinada a partir de curva padrão de L-prolina.

3.7 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste F a 5% de probabilidade de erro), realizando o teste de Tukey para os níveis de água e a análise de regressão para as doses de Si, utilizando-se o software SISVAR 5.6 (REF). Um estudo de matriz de correlação de Pearson também foi realizado para se identificar respostas correlacionadas entre as variáveis utilizando os softwares R[®] e Rstudio[®].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da análise da matriz de Pearson foi possível observar a correlação entre as variáveis analisadas. Os parâmetros estudados foram submetidos a análise de correlação e observados os efeitos significativos a 5% de probabilidade pelo teste P (Figura 1). Observou-se correlação positiva entre as variáveis AP, DC, VR, %U e CRA foliar, AST e AALT foliar. Essa resposta é confirmada pelos resultados apresentados na matriz de correlação, os quais confirmam a significância destas correlações, exceto para AALT foliar, na qual, observou-se correlação significativa apenas para o conteúdo de AST nas folhas (Figura 1).

Decorrente das respostas citadas, notou-se melhorias no status hídrico foliar da planta (%U foliar e CRA foliar) favorecendo o crescimento absoluto (AP, DC, VR). Segundo Silva et al. (2015), a fase de crescimento é uma das etapas em que ocorre o maior consumo de água dentre todas as outras fases de produção. Sendo necessário aporte hídrico adequado, principalmente foliar onde ocorre a maior atividade metabólica da planta, a fim de estimular a multiplicação e expansão celular. Segundo Castro et al. (2018), o maior conteúdo de água pode proporcionar maior taxa fotossintética e biossíntese de seiva orgânica (hormônios e carboidratos), estimulando assim o crescimento vegetal.

A biossíntese de compostos orgânicos, como os carboidratos (AST foliar) também foi influenciada positivamente com o aumento do status hídrico, assim como o aumento de AALT foliar, sendo essas moléculas, de suma importância no metabolismo vegetal. Os AST (sacarose e glicose) atuam como substratos para a respiração celular ou como osmólitos para manutenção da homeostase celular em condições de estresse (XU et al., 2015) e os AALT, que além de suas funções semelhantes no ajustamento osmótico, podem ser utilizados como fonte de nitrogênio para síntese proteica, bem como estoque de energia para as plantas se recuperarem de forma mais rápida do estresse hídrico (SUGUIYAMA et al., 2014), o que reforça que estes são de expressiva importância para o crescimento vegetal, justificando a correlação positiva entre estas variáveis de crescimento (Figura 1).

A AP, o DC e VR, tiveram correlação negativa significativa com o teor de AST e AALT em raízes e PRO em folha e raiz, que por sua vez se correlacionaram positivamente entre si (Figura 1). Em condições de estresse esses compostos podem se acumular em órgãos, como as raízes, melhorando a absorção de água mantendo a planta viva. Contudo, há um redirecionamento de energia e de elementos importantes para o crescimento como o nitrogênio, para que haja produção destes osmólitos, como consequência pode-se haver redução na taxa de crescimento.

Os indicadores de status hídrico, como CRA e %U das raízes se correlacionaram negativamente de forma significativa com os AST e AALT foliar. Pode-se destacar ainda uma significativa correlação negativa do %U raiz com a AP e DC (Figura 1). O acúmulo de AST e AALT foliar consequentemente aumentou o status hídrico foliar da planta, devido a sua atuação como osmólitos compatíveis (MOURA et al., 2016), fazendo com que tenha ocorrido direcionamento da água da raiz para as folhas, diminuindo o %U e CRA das raízes.

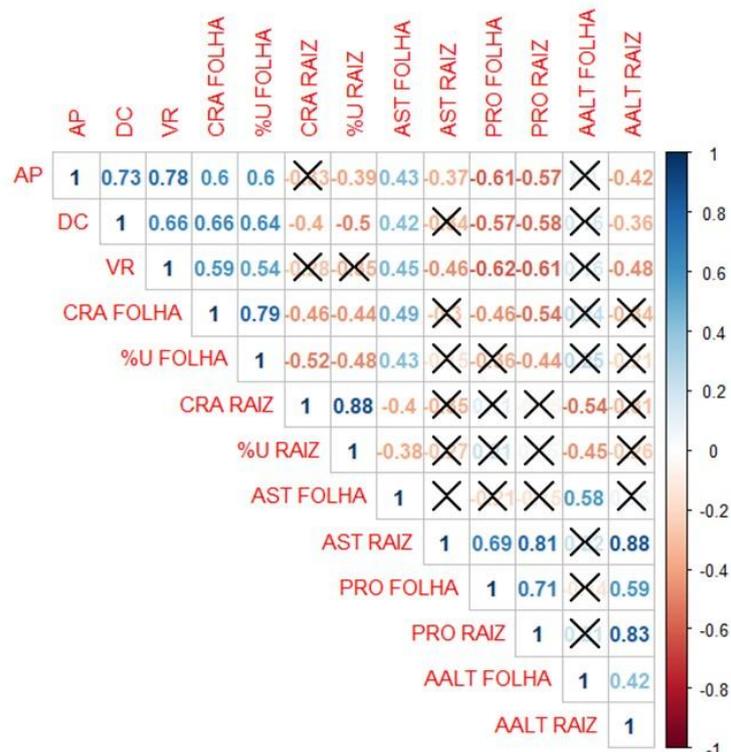


Figura 1. Matriz de correlação de Pearson mudas de mamoeiro suplementadas com silício e cultivadas com diferentes níveis de disponibilidade hídrica. Os X sobre os valores indicam que não há correlação significativa entre as variáveis.

O aumento das concentrações de Si influenciou positivamente a AP em todas as disponibilidades hídricas estudadas. O aumento mais expressivo correspondeu às plantas cultivadas com a concentração de 4 mmol L⁻¹ e irrigadas com 80% da CC, atingindo 15,7 cm planta⁻¹ (Figura 2A). Houve redução gradativa na AP com a diminuição dos níveis de água, sendo a menor AP de 8,44 cm planta⁻¹ no tratamento de 40% da CC sem aplicação de Si (Figura 2A). Pode-se destacar ainda que as plantas tratadas com 80% da CC diferiram estatisticamente das demais lâminas em todas as concentrações estudadas, exceto no tratamento sem aplicação de Si.

Sob deficiência hídrica as plantas sofrem alterações no crescimento, como interferências na divisão e expansão de suas células, sendo esta última condicionada à pressão de turgor (TAIZ et al., 2017). Lima et al. (2011) salientaram que o silício possui efeito benéfico sobre o organismo vegetal, notadamente, por atuar na otimização dos processos bioquímicos e fisiológicos, como é o caso da fotossíntese e melhorias no status hídrico da planta, refletindo-se no crescimento absoluto das culturas. Souza et al. (2015), relataram que a suplementação com Si promove incremento na AP e diâmetro do colmo, de plantas de milho.

Como verificado nas regressões da Figura 2B todas as medias do DC obtidas com as concentrações de Si, em cada nível de disponibilidade de água no solo, ajustaram-se ao modelo linear crescente. Destacando as plantas que foram tratadas com 4 mmol L⁻¹ de Si e irrigadas com 80% da ETc que apresentaram diâmetros correspondentes a 5,62 mm planta⁻¹. Menor DC foi observado nas plantas que não foram suplementadas com Si quando cultivadas com 40% da CC (4,10 mm planta⁻¹). De acordo com análise estática plantas cultivadas com concentração de Si a partir de 3 mmol L⁻¹ e tratadas com 60% da CC não diferem significativamente do tratamento controle (80% da CC) para o DC.

A falta de água no xilema (traqueídes e elementos de vasos) pode provocar a formação de bolhas de ar (embolismo) ou ainda interrupção do fluxo de água/seiva (cavitação) pela quebra da coluna de água, o que pode provocar também uma redução no diâmetro do caule da planta (VADEZ, 2014). Entretanto foi observado por Nunes et al. (2019) que a aplicação de Si em tomateiro sob condições de déficit hídrico, promoveu aumento do diâmetro do caule nas plantas em função da aplicação de Si.

O volume radicular foi influenciado positivamente pelo aumento das concentrações de Si em todas as disponibilidades hídricas avaliadas. O maior volume radicular foi observado em mudas irrigadas com 80% da CC e tratadas com a concentração de 4 mmol L⁻¹ (10 mm³ planta⁻¹) (Figura 2C). Já o menor volume radicular foi observado em plantas não tratadas com Si e submetidas ao regime hídrico de 40% da ETc (1,8 mm³ planta⁻¹) (Figura 2C). Contudo quando as mudas foram tratadas com dose de Si a partir de 3 mmol L⁻¹ não foi possível notar diferença significativa da disponibilidade hídrica de 80% para 60% da CC.

El-Sharkawy (2007) relatou que o crescimento de raízes pode ser reduzido em condições de estresse, incluindo a baixa disponibilidade hídrica. Correa (2019) observou influência positiva do Si em raízes de tomate sob déficit hídrico, como visto no presente estudo. O autor atribuiu isso a uma possível indução da biossíntese de hormônios que promoveriam crescimento do sistema radicular, o que poderia aumentar a área de exploração de solo e, conseqüentemente, a absorção de água.

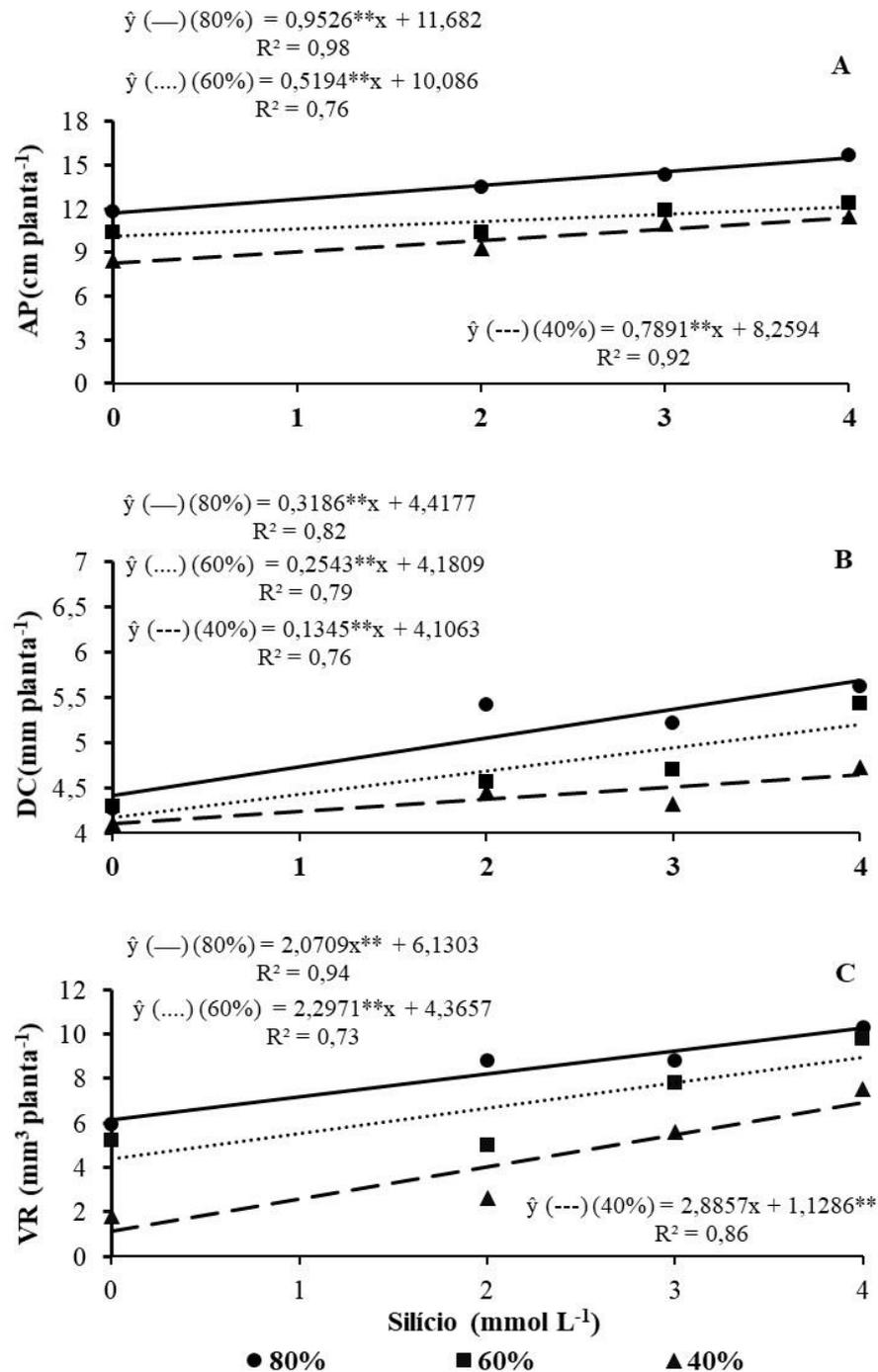


Figura 2. Altura da planta (A), diâmetro do caule (B) e volume radicular (C) de mudas de mamoeiro suplementadas com silício (1, 2, 3 e 4 mmol L^{-1} de Si) e cultivadas com diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo (40, 60 e 80% CC).

O CRA em folhas de mamoeiro obteve incremento linear, devido ao aumento nas doses de Si em todos os níveis de água avaliadas, sendo que as plantas tratadas com 4 mmol L^{-1} de Si, tiveram o aumento do CRA em todas as lâminas de água, destacando as plantas irrigadas com 80% da CC sob respectivo tratamento com Si, com valor máximo do CRA de 120,54%,

enquanto que as plantas sem aplicação de Si e irrigadas com 40% da CC obtiveram CRA de 80,56%. É possível destacar ainda que nas concentrações de 3 e 4 mmol L⁻¹ de Si os níveis de água aplicados no solo não diferem estaticamente entre si (Figura 3A). Com relação ao %U, o percentual máximo foi de 92% nas plantas cultivadas com disponibilidade hídrica de 80% da CC sob 4 mmol L⁻¹ de Si. Entretanto, o menor valor foi de 60,11% nas plantas irrigadas com lâmina de 40% da CC na ausência de Si. Todavia, não houve diferença significativa entre as plantas irrigadas com 80% e 60% da CC quando tratadas com 3 mmol L⁻¹ de Si (Figura 3B).

Resultados semelhantes foram encontrados por Souza et al. (2014) relatando efeito negativo do déficit hídrico no status hídrico nas folhas de milho (*Zea mays* L.), porém, a aplicação de Si amenizou os efeitos deletérios da restrição hídrica sobre o status hídrico foliar, quando comparada com plantas cultivadas sob deficiência hídrica e sem aplicação de Si. Aplicação exógena de Si pode induzir maior teor de água no tecido foliar, que por sua vez, é promovido como maior protetor na atividade de proteínas que contribuem na absorção de água, como as aquaporinas, aumentando a quantidade de água, tanto pela facilidade de absorção quanto pela diminuição das perdas (LIU et al., 2014; LIU et al., 2015).

Por outro lado, o aumento na concentração de Si acarretou no decréscimo do CRA nas raízes de mamoeiro em todas as lâminas de irrigação testadas, nos quais, o menor CRA observado está relacionado as plantas tratadas com 4 mmol L⁻¹ em 40% da CC, correspondendo a 98,92%, em contrapartida as plantas sem aplicação de Si e cultivadas com 80% da disponibilidade hídrica foram as que tiveram maior CRA nas raízes com 159,69%. O déficit hídrico acarretou a diminuição do CRA nas raízes, sendo esta redução representada por 20%, da lâmina de 60 para 40% CC (Figura 3C).

O %U das raízes das plantas cultivadas com 60 e 80% da CC tiveram redução linear com o aumento das doses de Si, onde os menores valores encontrados nas respectivas lâminas foram de 97,97 e 83,95%, respectivamente, quando tratadas com a concentração de 4 mmol L⁻¹ de Si. Não foi observado influência significativa das doses de Si nas plantas cultivadas com 40% da CC (Figura 6D). A restrição de água no solo ocasionou decréscimo de aproximadamente 25% da lâmina de 60 para 40% da CC. Ainda, não houve diferença estatística entre as lâminas de 60 e 80% da CC, nem quando as plantas foram cultivadas com Si a partir da dose de 3 mmol L⁻¹ independente da disponibilidade hídrica (Figura 3D).

Este decréscimo nas variáveis de status hídrico (CRA e %U) nas raízes com o aumento da dose de Si, pode ter ocorrido devido ao aumento do CRA e %U nos tecidos foliares, fazendo com que o fluxo de água seja direcionada para as folhas, podendo está relacionado com a

aplicação de Si ter sido realizada diretamente na folha, proporcionando assim maior status hídrico para este órgão.

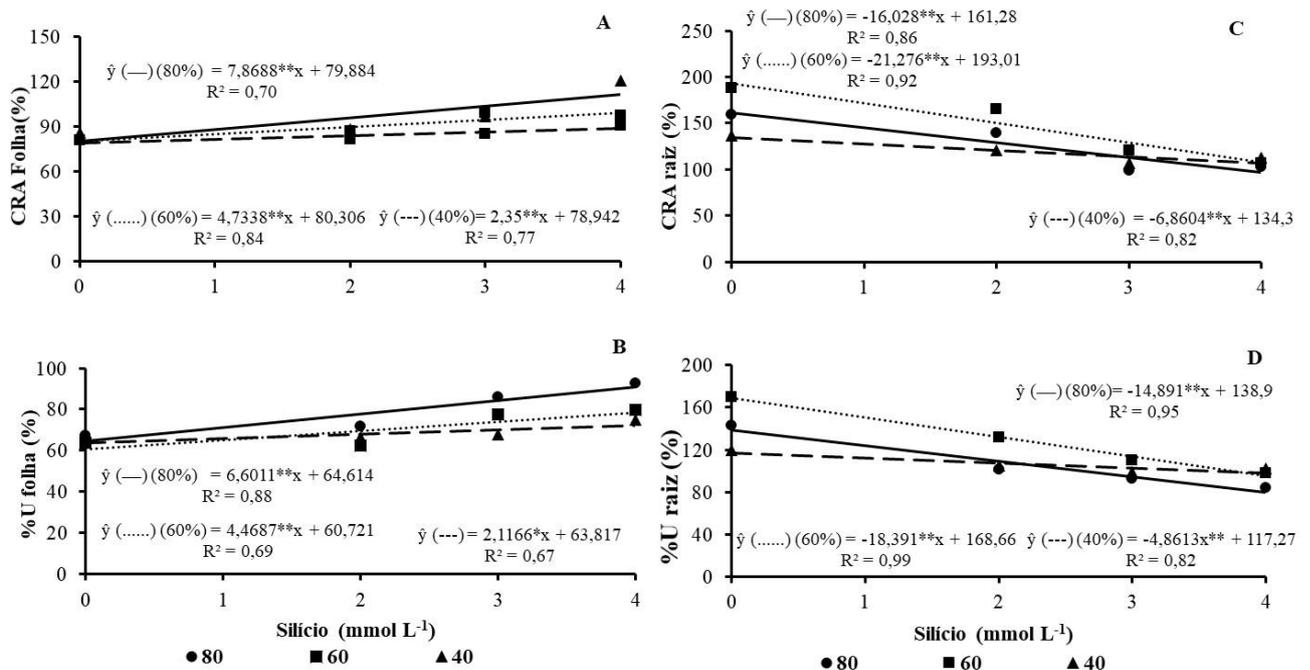


Figura 3. Conteúdo relativo de água foliar (A), Percentual de umidade foliar (B), Conteúdo relativo de água da raiz (C) e Percentual de umidade da raiz de mudas de mamoeiro suplementadas com silício (1, 2, 3 e 4 mmol L⁻¹ de Si) e cultivadas com diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo (40, 60 e 80% CC)

Com relação ao conteúdo foliar de AST observou-se ajustamento linear com o aumento das doses de Si nas plantas sob todas as lâminas de irrigação (40, 60 e 80% da CC), com valores de 318,03; 160,38 e 231,98 mg de AST g⁻¹ de MF respectivamente, na dose de 4 mmol L⁻¹ de Si. No entanto quando irrigadas com 40% da CC sem suplementação de Si, houve diminuição no conteúdo de AST (16,71 mg de AST g⁻¹ de MF), tornando-se inferior às demais (Figura 4A). Não foram observadas diferenças estatísticas para AST em raiz com relação às doses de Si, porém, a diminuição da disponibilidade hídrica para 40% da CC resultou no aumento de AST, em aproximadamente 47 e 37% em comparação aos tratamentos de 60 e 80% da CC (Figura 4B).

Em condições adversas para as plantas, os açúcares solúveis sintetizados nas folhas são utilizados para manter os processos metabólicos e anatômicos ativos, tais como a respiração e o crescimento da planta (PEDROSO et al., 2014), reagindo osmoticamente ao aumento da disponibilidade de água nos tecidos, a fim de contribuir para a adaptação ou simplesmente para ajuste ao estresse hídrico (VITORINO et al., 2012), como foi observado nos conteúdos de AST de folha e raiz na presente pesquisa. Ming et al. (2012) ressaltaram que o silício aumenta a

tolerância das plantas ao déficit hídrico pelo fato de aumentar os níveis de açúcares que minimizam o desequilíbrio osmótico. Um dos possíveis mecanismos de aumento de osmorreguladores nos vegetais é a continuidade da atividade fotossintética na planta mesmo em condições de déficit hídrico (CAO et al., 2015). Estes fatos explicam o aumento de AST foliar encontrados no presente estudo.

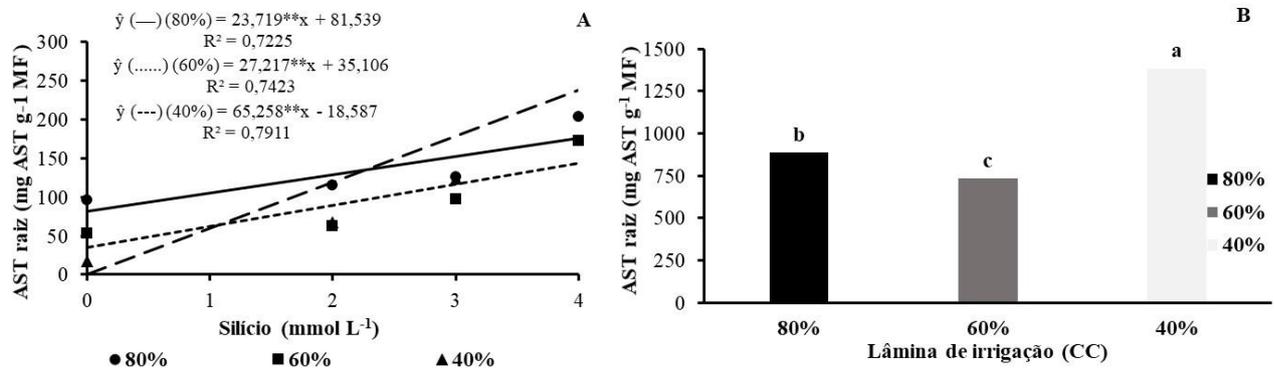


Figura 4. Açúcares solúveis totais da folha (A), açúcares solúveis totais da raiz (B) de mudas de mamoeiro suplementadas com silício (1, 2, 3 e 4 mmol L⁻¹ de Si) e cultivadas com diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo (40, 60 e 80% CC).

O conteúdo de aminoácido foliar foram ajustados ao modelo de regressão linear com aplicação de Si sob todos os níveis de água no solo avaliados, ressaltando que a concentração de 4 mmol L⁻¹ de Si promoveu o maior acúmulo de AALT, correspondendo a 8473,98 (40% da CC), 5775,03 (60% da CC) e 6751,843 μmol de AALT g⁻¹ de MF (80% da CC)(Figura 5A). Pode-se ressaltar que a redução na disponibilidade hídrica para 40% da CC promoveu o acúmulo de aminoácidos mais expressivo dentre as lâminas estudadas quando as plantas foram tratadas com Si, havendo incremento de 25% com relação a lâmina de 60% da CC e 32% quando comparadas com 80% da CC (Figura 5A).

As doses de Si não influenciaram significativamente o conteúdo de AALT nas raízes de mamoeiro. Contudo foi possível observar acúmulo de AALT nas raízes com redução da lâmina de irrigação para 40% da CC, sendo este incremento por volta de 31% com relação às demais disponibilidades hídricas (Figura 5B).

A seca compromete o metabolismo do nitrogênio alterando os aspectos quantitativos de proteínas e aminoácidos. Essas alterações ocorrem, muitas vezes, visando o ajustamento fisiológico para atenuar os efeitos deletérios da seca sobre o metabolismo vegetal (BHARGAVA e SAWANT, 2013). Oliveira et al. (2013) avaliando plantas jovens de graviola em condições de deficiência hídrica, também relataram acúmulo de aminoácidos livres sob essas

condições de cultivo. Sonobe et al. (2010) observaram que a aplicação de Si também aumentou o conteúdo de aminoácidos em plantas de sorgo e isso poderia melhorar a absorção de água pela raiz sob condições de déficit hídrico, através do ajustamento osmótico.

Além disso Detmann et al. (2012) destacam também o importante papel do Si na atuação como sinalizador para remobilização de aminoácidos. Os autores enfatizam correlação positiva entre a concentração de Si e os níveis de aminoácidos alanina, arginina, glutamina, ornitina, isoleucina, metionina e valina. Os autores ainda ressaltam que no arroz, o Si provoca alterações no balanço de nitrogênio na sob condições inoportunas, em que esse acréscimo nos índices de aminoácidos promove condições para suportar o aumento da demanda de N durante o desenvolvimento. Estes dados suportam a hipótese de que o Si tem um papel de sinalização nas células vegetais (LUYCKX et al., 2017).

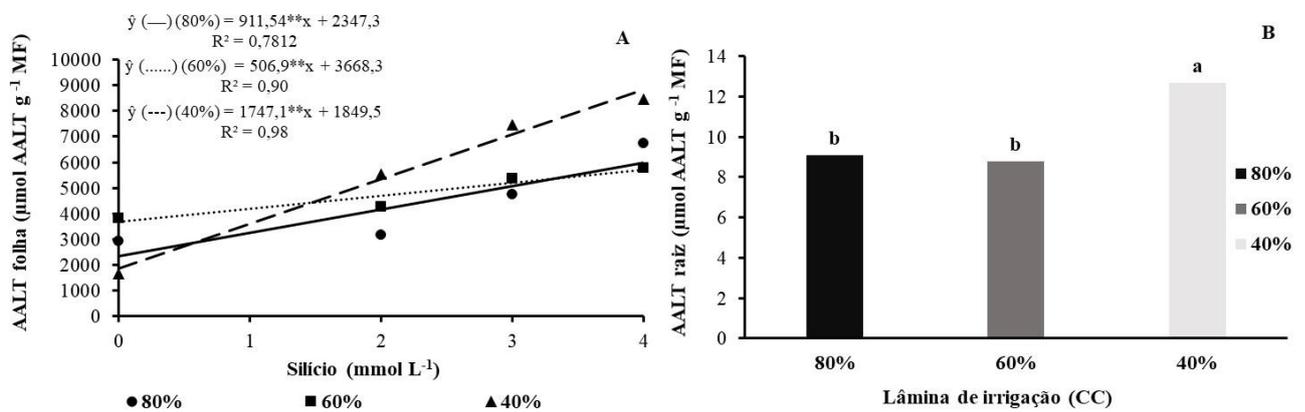


Figura 5. Aminoácidos livres totais em folha (A) e aminoácidos livres totais em raiz (B) de mudas de mamoeiro suplementadas com silício (1, 2, 3 e 4 mmol L⁻¹ de Si) e cultivadas com diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo (40, 60 e 80% CC).

O teor foliar de PRO nas plantas tratadas com 60 e 40% da CC, foram ajustados aos modelo quadrático em função das doses de Si, reduzindo a concentração de PRO a partir de 2 mmol L⁻¹ de Si, com valores de 125,30 e 70,30 μg de PRO g⁻¹ de MF sendo estes as menores concentrações de PRO entre as doses de Si testadas. No entanto, as maiores concentrações foram observadas nas lâminas de 40% (214,03 μg de PRO g⁻¹ de MF) e 60% da CC (140,85 μg de PR g⁻¹ de MF), sem aplicação de Si. O conteúdo de PRO foliar não sofreu influência significativa sob os tratamentos de Si na restrição hídrica de 80% da CC. Houve incremento foliar de PRO de 44% com redução da lâmina de irrigação de 80 para 40% da CC (Figura 6A). Em relação aos conteúdos de PRO radicular, não foi possível observar influência significativa do Si sob as

restrições hídricas. Entretanto, notou-se incremento de aproximadamente 27% com redução da lâmina de 80 para 40% da CC (Figura 6B).

Plantas sob déficit hídrico podem apresentar acúmulo de algumas moléculas osmorreguladoras, como prolina que aumentam o potencial osmótico celular, garantindo a manutenção da absorção de água e da pressão de turgescência celular, que são considerados mecanismos chave na manutenção da taxa fotossintética, abertura estomática e expansão celular em condições de deficiência hídrica (FANG e XIANG, 2015; SANDERS e ARNDT, 2016). Albuquerque et al. (2013), constataram aumento expressivo nas concentrações de prolina em plantas jovens de *C. guianensis* e de *K. ivorensis* submetidas a déficit hídrico.

Os resultados encontrados no presente estudo são semelhantes aos observados por Souza et al. (2014), que notaram redução no conteúdo foliar de prolina em folhas de sorgo sob deficiência hídrica e tratadas com Si, fato este que pode ser explicado devido a melhoria no status hídrico da planta decorrente da aplicação de Si, sem necessidade assim da produção de prolina para este fim.

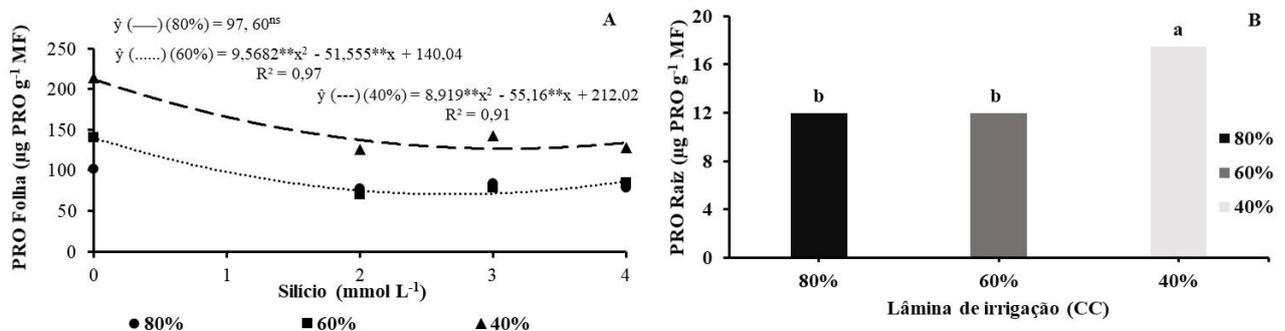


Figura 6. Prolina em folha (A) e prolina em raiz (B) de mudas de mamoeiro suplementadas com silício (1, 2, 3 e 4 mmol L^{-1} de Si) e cultivadas com diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo (40, 60 e 80% CC).

5. CONCLUSÕES

Aumento no status hídrico foliar e na concentração de açúcares e aminoácidos nas folhas promoveram maior crescimento de plantas de mamoeiro.

As doses de Si influenciaram positivamente o crescimento e o status hídrico foliar de mudas de mamoeiro.

A aplicação de Si promoveu ajustamento osmótico das mudas de mamoeiro.

O Si não teve influência sob as características bioquímicas da raiz de mudas de mamoeiro.

A concentração de 4 mmol L^{-1} de Si é que promove melhores características nas mudas de mamoeiro submetidas e déficit hídrico.

As mudas de mamoeiro irrigadas com 60% da CC e tratadas com Si, obtém desempenhos satisfatórios na maioria das características avaliadas quando comparadas as cultivadas com 80% da CC.

6. REFERÊNCIAS

Anual brasileiro da fruticultura. 2018. Disponível em:

[http://www.editoragazeta.com.br/flip/anuario-](http://www.editoragazeta.com.br/flip/anuario-fruticultura2018/files/assets/basichtml/page17.html)

[fruticultura2018/files/assets/basichtml/page17.html](http://www.editoragazeta.com.br/flip/anuario-fruticultura2018/files/assets/basichtml/page17.html). Acesso em: 02/12/2019.

AHMED, M.; ASIF, M.; HASSAN, F. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, p. 473–483, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1427-2>.

AJITHKUMAR, I. P.; PANNEERSELVAM, R. ROS scavenging system, osmotic maintenance, pigment and growth status of *Panicum sumatrense* Roth under drought stress. **Cell Biochemistry and Biophysics**, v. 68, p. 587-595, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12013-013-9746-x>.

ANJUM, S. A.; ASHRAF, U.; TANVEER, M.; KHAN, I.; HUSSAIN, S.; SHAHZAD B.; ZOHAIB, A.; ABBAS, F.; SALEEM, M. F.; ALI, I.; WANG, L. C. Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 69, p. 1-12, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2017.00069>

ALBUQUERQUE, M. P. F.; MORAES, F. K. C.; SANTOS, R. I. N.; CASTRO, G. L. S.; RAMOS, E. M. L. S.; PINHEIRO, H. A. Ecofisiologia de plantas jovens de mogno africano submetidas a déficit hídrico e reidratação. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 48, n.1, p. 9-16, 2013.

ALSINA, M. M.; SMART, D. R.; BAUERLE, T.; DE HERRALDE, F.; BIEL, C.; STOCKERT, C.; SAVE, R. Seasonal changes of whole root system conductance by a drought-tolerant grape root system. **Journal Experimental Botany**, v. 62, p. 99–109, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erq247>.

AMIN, M.; AHMAD, R.; BASRA, S. M. A.; MURTAZA, G. Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea Mays* L.) under water deficit. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 51, n. 1, p. 187–196, 2014.

ASHRAF, M.; AKRAM, N. A.; ALQURAINY, F.; FOOLAD, M. R. Drought tolerance: roles of organic osmolytes, growth regulators, and mineral nutrients. **Advances in Agronomy**, v.111, p.249-296, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387689-8.00002-3>.

BATES, L. S. Rapid determination of free proline for water stress studies. **Plant and Soil**, v.39, p.205-207, n. 1/2, 1973. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00018060>.

BIDWELL, R. G. S. **Plant Physiology**. New York: MaccMillan, 1974. 643 p. (The Maccmillan Biology Series).

BHARGAVA, S.; SAWANT, K. Drought stress adaptation: metabolic adjustment and regulation of gene expression. **Plant Breeding**, v. 132, n. 1, p. 21-32, 2013.

BOWNE, J. B.; ERWIN, T. A.; JUTTNER, J.; SCHNURBUSCH, T.; LANGRIDGE, P.; BACIC, A. Drought responses of leaf tissues from wheat cultivars of differing drought tolerance at the metabolite level. **Molecular Plant**, v. 5, n. 2, p. 418-429, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1093/mp/ssr114>.

BRAPEX – Associação Brasileira dos Produtores e Exportadores de Papaya. 2015. Disponível em: < http://www.brapex.net/2013/informativos/Informe_Brapex_Edicao_59.pdf>. Acesso em: 26/ 12/ 2019.

CAMPOSTRINI, E.; GLENN, D. M. Ecophysiology of papaya: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, n. 4, p.413-424, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202007000400010>.

CAO, L.B; MA, MA, Q.; ZHAO, Q.; WANG, L.; XU, K. Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. **Scientia Horticulturae**, v. 194, p. 53-62. 2015.

CASTRO, V.R.; SURDI, P.G.; TOMAZELLO FILHO, M.T.; CHAIX, G.; LACLAU, J.P. Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio no crescimento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**. v.45, n.113, p. 89-99, 2017.

CHEN, W.; YAO, X.; CAI, K.; CHEN, A. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. **Biological trace element research**, v. 142, n. 1, p. 67-76, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8742>.

CHEN, D.; CAO, B.; WANG, S.; LIU, P.; DNEG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific reports**, v. 6, p. 22882, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep22882>.

COELHO, E. F.; SILVA, J. G. F.; ALVES, A. A. C; CRUZ, J. L. **Irrigação do mamoeiro**. Cruz das Almas, BA: EMBRAPA, 8 p. 2003. (Circular técnica, 54).

CORRÊA, C. V. **Aplicação de silício em plantas de tomate cultivar micro-tom sob déficit hídrico**, p.107, 2019. 108f. Tese (Doutorado em Agronomia)- Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, São Paulo.

DESHMUKH, R. K.; VIVANCOS, J.; GUÉRIN, V.; SONAH, H.; LABBÉ, C.; BELZILE, F.; BÉLANGER, R. R. Identification and functional characterization of silicon transporters in soybean using comparative genomics of major intrinsic proteins in *Arabidopsis* and rice. **Plant molecular biology**, v. 83, n. 4-5, p. 303-315, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-013-0087-3>.

DETMANN, K. C.; ARAÚJO, W. L.; MARTINS, S. C.; SANGLARD, L. M.; REIS, J. V.; DETMANN, E.; DAMATTA, F. M. Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. **New Phytologist**. v. 196, p. 752–762, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04299.x>.

DUBOIS, M.; GILLES K. A.; HAMILTON J. K.; REBER P. A.; SMITH F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analyst Chem**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>.

EL-SHARKAWY, M.A. Physiological characteristics of cassava tolerance to prolonged drought in the tropics: implications for breeding cultivars adapted to seasonally dry and semiarid environments. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, p.257-286, 2007.

EXLEY, C. A possible mechanism of biological silicification in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p.853, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00853>.

FAHAD, S.; NAZIR, U.; ANJUM, S. A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; et al. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1147, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>.

FANG, Y.; XIANG, L. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**. V. 72, p.673–689, 2015.

FAO STAT. **FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS**. Data. Disponível em: Acesso em: 02/12/2019.

FERREIRA, A. M.; et al. Revisão de estudos clínicos de enfermagem: utilização de Papaína para o tratamento de feridas. Rio de Janeiro, **Revista de Enfermagem UERJ**, v. 13, p. 382- 389, 2005.

FLEXAS, J.; GALLÉ, A.; GALMÉS, J.; RIBAS-CARBO, M.; MEDRANO, H. The response of photosynthesis to soil water stress. In: **Plant Responses to Drought Stress**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. p. 129-144.

GALO, J. Q. B; SOUZA, M. L. D.; KUSDRA, J. F.; & MATTIUZ, C. F. M. Conservação pós-colheita de mamão 'Sunrise solo' com uso de quitosana. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 2, p. 305-312, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-2945-194/13>.

GRÉGOIRE, C.; RÉMUS-BOREL, W.; VIVANCOS, J.; LABBÉ, C.; BELZILE, F.; BÉLANGER, R. R. Discovery of a multigene family of aquaporin silicon transporters in the primitive plant *Equisetum arvense*. **The Plant Journal**. v. 72, p. 320–330, 2012. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2012.05082.x>.

GUERRIERO, G.; HAUSMAN, J.-F.; LEGAY, S. Silicon and the plant extracellular matrix. **Frontiers in Plant Science**. v. 7, p. 463, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.0046>.

HABIBI, G. Silicon supplementation improves drought tolerance in canola plants. **Russian Journal of Plant Physiology**. v. 61, p. 784–791, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1021443714060077>

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

HAYNES, R.J. Uma visão contemporânea da disponibilidade de silício em solos agrícolas. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 177, p. 831-844. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002 / jpln.201400202>

HE, C.; WANG, L.; LIU, J.; LIU, X.; LI, X.; MA, J.; et al. Congwu et al. Evidence for 'silicon' within the cell walls of suspension- cultured rice cells. **New Phytologist**, v. 200, n. 3, p. 700-709, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.12401>.

HE, C.; MA, J.; WANG, L. A hemicellulose- bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall of rice. **New Phytologist**, v. 206, n. 3, p. 1051-1062, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13282>.

IBGE: **Produção agrícola municipal** 2017.

https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/66/pam_2017_v44_br_informativo.pdf.

Acesso em 02/02/2020.

KHATTAB, H. I.; EMAM, M. A.; EMAM, M. M.; HELAL, N. M.; AND MOHAMED, M. R. Effect of selenium and silicon on transcription factors NAC5 and DREB2A involved in drought-responsive gene expression in rice. **Biologia plantarum**, v. 58, n. 2, p. 265-273, 2014.

KORNDÖRFER, A. P.; GRISOTO, E.; VENDRAMIM, J. D. Induction of Insect Plant Resistance to the Spittlebug *Mahanarva fimbriolata* Stål (Hemiptera: Cercopidae) in Sugarcane by Silicon Application. **Neotropical Entomology**, v. 40, n. 3, p. 387-392, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-566X2011000300013>.

LEITE, A. P.; OLIVEIRA B. G. R. B. D.; SOARES, M. F.; BARROCAS, D. L. R.. Uso e efetividade da papaína no processo de cicatrização de feridas: uma revisão sistemática. **Revista Gaúcha Enfermagem**, p.198-207, 2012.

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. Water stress in plants: causes, effects and responses. In: RAHMAN, I. M. M. (Ed.). **Water Stress**. Rijeka: Intech, 2012. cap. 1, v. 1, p. 1-14.

LIU, H. X.; GUO, Z. G. Forage Yield and water use efficiency of alfalfa applied with silicon under water deficit conditions. **Philipp Agric Scientist**, v. 96, p. 370-376, 2013.

LIU, P.; YIN, L.; DENG, X., WANG, S.; TANAKA, K.; ZHANG, S. Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, 4747–4756, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru220>.

LIU, P.; YIN, L.; WANG, S.; ZHANG, M.; DENG, X.; ZHANG, S., et al. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. **Environmental and Experimental Botany**, v. 111, 42–51, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru220>.

LORENZI, H.; BACHER, L.; LACERDA, M.; SARTORI, S. **Frutas brasileiras e exóticas cultivadas**. Instituto Plantarum. São Paulo, SP. 2006. 640p.

LUYCKX, M.; HAUSMAN, J. F.; LUTTS, S.; GUERRIERO, G. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. **Plant Science**. v. 8, n. 411, p. 1-8, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411>.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v.1, n.8, p. 342-397, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>.

- MA, J.; CAI, H.; HE, C.; ZHANG, W.; WANG, L. A hemicellulose- bound form of silicon inhibits cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells. **New Phytologist**, v. 206, n. 3, p. 1063-1074, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13276>.
- MANICA, I., MARTINS, D. dos S., VENTURA, J. A. **Mamão: Tecnologia de produção, pós-colheita, exportação, mercados**. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2006. 361p.
- MARAFON, A. C.; ENDRES, L. “Silicon: fertilization and nutrition in higher plants,” Amazonian. **Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 4, p. 380-388, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2013.057>.
- MARIJUAN, M. P.; BOSCH, S. M. Ecophysiology of invasive plants: osmotic adjustment and antioxidants. **Trends in Plant Science**, v. 18, n. 12, p. 660-666, Set. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.08.006>.
- MELO, A. S.; SUASSUNA, J. F.; FERNANDES, P. D.; BRITO, M. E. B.; SUASSUNA, A. F.; AGUIAR NETO, A. O. Crescimento vegetativo, resistência estomática e rendimento do fruto da melancia em diferentes níveis de água. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 73-79, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.2136>.
- MING, D. F.; PEI, Z. F.; NAEEM, M. S.; GONG, H. J.; ZHOU, W. J. Silicon alleviates peg-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 198, p. 14–26, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x>.
- MIZOI, J.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. AP2/ERF family transcription factors in plant abiotic stress responses. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Regulatory Mechanisms**, v. 1819, n. 2, p. 86-96, 2012.
- MONTEIRO J.G.; CRUZ F.J.R.; NARDIN M.B.; SANTOS D.M.M. Crescimento e conteúdo de prolina em plântulas de guandu submetidas a estresse osmótico e à putrescina exógena. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 1, p. 18-25, 2014.
- MORANDO, R.; SILVA, A. O.; CARVALHO, L. C.; M A PINHEIRO, M. P. Déficit Hídrico: Efeito Sobre a Cultura Da Soja. **Journal of Agronomic Sciences**, v.3, n. especial, 114–129. 2014.
- MOURA, A. R. D.; NOGUEIRA R. J. M. C.; SILVA, J. A. A. D.; LIMA, T. V. D. Water relations and organic solutes in young plants of *Jatropha curcas* L. Under different water regimes. **Ciência Florestal**, v.26, n.2, p.345-354, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509822735>.
- MUNEER, S.; PARK, Y. G.; MANIVANNAN, A.; SOUNDARARAJAN, P.; JEONG, B. R. Physiological and proteomic analysis in chloroplasts of *Solanum lycopersicum* L. under silicon efficiency and salinity stress. **International journal of molecular sciences**, v. 15, n. 12, p. 21803-21824, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms151221803>.
- MWADZINGENI, L.; SHIMELIS, H.; DUBE, E.; LAING, M. D.; TSILO, T. J. Breeding wheat for drought tolerance: Progress and technologies. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 15, p. 935–943, 2016. doi: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61102-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61102-9).

NUNES, A. M. C.; LIMA NUNES, L. R.; RODRIGUES, A. J. O.; UCHÔA, K. S. A. silício na tolerância ao estresse hídrico em tomateiro. **Revista Científica Rural**, v. 21, n. 2, p. 239-258, 2019.

OSAKABE, Y.; OSAKABE, K.; SHINOZAKI, K.; TRAN, L. S. P. Response of plants to water stress. **Frontiers in plant science**, v. 5, p. 86, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>.

OLIVEIRA, L. M. D.; SILVA, J. N. D.; COELHO, C. C. R.; NEVES, M. G.; SILVA, R. T. L.D.; OLIVEIRA NETO, C. F. D. Pigmentos fotossintetizantes, aminoácidos e proteínas em plantas jovens de graviola submetida ao déficit hídrico. **Agroecossistemas**, v. 5, n. 1, p. 39-44, 2013.

PARISA SHARIFI. Effect of Silicon Nutrition on Yield and Physiological Characteristics of Canola (*Brassica napus*) under Water Stress Conditions. **International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)**. Vol. 8, n. 1, p. 144-153, 2017.

PEDROSO, F. K. J. V.; PRUDENTE, D. A.; BUENO, A. C. R.; MACHADO, E. C.; RIBEIRO, R. V. Drought tolerance in citrus trees is enhanced by rootstock dependent changes in root growth and carbohydrate availability. **Environmental and Experimental Botany**, v. 101, p. 26-35, 2014.

PEREZ-MARTIN, A.; MICHELAZZO, C.; TORRES-RUIZ, J. M.; FLEXAS, J., FERNANDEZ, J. E.; SEBASTIANI, L.; et al. Regulation of photosynthesis and stomatal and mesophyll conductance under water stress and recovery in olive trees: correlation with gene expression of carbonic anhydrase and aquaporins. **Journal of experimental botany**, v. 65, n. 12, p. 3143-3156, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru160>.

RODRIGUES, F. A.; OLIVEIRA, L. A.; KORNDÖRFER, A. P. Silício: um elemento benéfico e importante para as plantas. **Informações Agronômicas**, n. 134, p. 14-20, 2011.

RODRIGUES, O.; RESHETNYAK, G.; GRONDIN, A.; SAIJO, Y.; LEONHARDT, N.; MAUREL, C.; et al. Aquaporins facilitate hydrogen peroxide entry into guard cells to mediate ABA- and pathogen-triggered stomatal closure. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 34, p. 9200-9205, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1704754114>.

QUEIROZ, R. J. B. **Resposta fisiológica e molecular de dois genótipos de milho à limitação hídrica**. 2010. 167 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2010.

RAMOS, H. C; PEREIRA, M. G; GONÇALVES, L. S.; BERILLI, A. P.; PINTO, F. O.; RIBEIRO, E. H. Multivariate analysis to determine the genetic distance among backcross papaya (*Carica papaya*) progenies. **Genetic Molecular Research**, v. 2, n. 11, Jan. 2012. DOI: <https://doi.org/10.4238/2012.May.14.2>.

REETZ, E. R. **Anuário Brasileiro de Fruticultura 2014**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta, p.104, 2015.

SANDERS, G.J.; ARNDT, S.K. Osmotic adjustment under drought conditions. In: **Plant Responder to Drought Stress**. Cap. 8, 199-229; 2016.

SANT'ANA, E. P.; SANT'ANA, E. V. P.; FAGERIA, N. K.; FREIRE, A. D. B. Utilização de fósforo e características do sistema radicular e da parte aérea da planta de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 2, p. 370-381, 2003.

SAVVAS, D.; NTATSI, G. Biostimulant activity of silicon in horticulture. **Scientia Horticultura**, v. 196, n.30, p. 66-81, Nov. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.scienta.2015.09.010>.

SIDDIQUI, M. H.; AL-KHAISHANY, M. Y.; AL-QUTAMI, M. A.; AL-WHAIBI, M. H.; GROVER, A., ALI, H. M.; AL-WAHIBI, M. S.; BUKHARI, N. A. Response of different genotypes of faba bean plant to drought stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, n. 5, p. 10214-10227, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms160510214>.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; HAN, W.; FENG, R.; HU, Y.; GUO, J., et al. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p.196, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00196>

SILVA, J. G. F.; COELHO, E. F. Irrigação do mamoeiro. In: Martins, D. dos S.; Costa, A. de F. S. da (Ed.) **A cultura do mamoeiro: tecnologias de produção**. Vitória, ES: Incaper, p. 163-198, 2003.

SILVA JÚNIOR, E. G. D. S. **Mecanismos fotossintéticos e osmoproteção induzidos por silício em plantas de mamoeiro sob déficit hídrico**. Campina Grande, 2018. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Universidade Estadual da Paraíba / Embrapa Algodão.

SILVA, C. R. A.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, A. S.; KLIPPEL, V. H.; BARBOSA, R. L. P. Desenvolvimento biométrico de mudas de eucalipto sob diferentes lâminas de irrigação na fase de crescimento. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 381-390, 2015.

SLAVÍK, B. **Methods of studying plant water relations**. Berlim: Springer Verlag, 1974. 449p.

SINGH, M.; KUMAR, J.; SINGH, S.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M. Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. **Reviews in Environmental Science and BioTechnology**, Dordrecht, v. 14, p. 407- 426, 2015.

SONOBE, K.; HATTORI, T.; AN, P.; TSUJI, W.; ENEJI, A. E.; KOBAYASHI, S., et al. Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 34, p. 71–82, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.531360>.

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

SOUZA, J.P.F.; MARTINS, G.L.M.; PEREIRA, A.C.; BINOTTI, F.F.S.; MARUYAMA, W.I. Efeito de silicato de cálcio e magnésio no crescimento inicial de milho transgênico. **Revista de**

Agricultura Neotropical, Cassilândia, v.2, n.3, p.13-17, 2015. DOI: <https://doi.org/10.32404/rean.v2i3.280>.

SOUZA, L. D., SOUZA, L. DA S., LEDO, C. A. DA S., & CARDOSO, C. E. L. Distribuição de raízes e manejo do solo em cultivo de mamão nos Tabuleiros Costeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n. 12, p. 1937–1947, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016001200004>.

STORCKL, C. R.; NUNES, G. L.; OLIVEIRA, B. B.; BASSOL, C. Folhas, talos, TANNER, Arnold O. (Ed.). Vermiculite. Estados Unidos: USGS, 2015. 2 p. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/vermiculite/mcs-2015-vermi.pdf> . Acesso em: 08/12/2019.

SUGUIYAMA, V. F.; SILVA, E. A.; MEIRELLES, S. T.; CENTENO, D. C.; BRAGA, M. R. Leaf metabolite profile of the Brazilian resurrection plant *Barbacenia purpurea* Hook (Velloziaceae) shows two time-dependent responses during desiccation and recovering. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 1-1, 2014.

TAIZ L, ZEIGER E, MØLLER IM, MURPHY A. (2017) **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Artmed, Porto Alegre.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, V. P.; GANGWAR, S.; PRASAD, S. M.; MAURYA, J. N.; CHAUHAN, D. K. Role of silicon in enrichment of plant nutrients and protection from biotic and abiotic stresses. In: **Improvement of crops in the era of climatic changes**. Springer, New York, NY, 2014. p. 39-56.

VADEZ, V. Root hydraulics: the forgotten side of roots in drought adaptation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 165, p. 15-24, 2014.

VERBRUGGEN, N.I HERMANS, C. Proline accumulation in plants: a review. **Amino Acids**, v.35, p.753-759, 2008. DOI: [10.1007/s00726-008-0061-6](https://doi.org/10.1007/s00726-008-0061-6).

VIANA, E. D. S.; REIS, R. C.; DA SILVA, S. C. S.; DAS NEVES, T. T.; DE JESUS, J. L. Avaliação físico-química e sensorial de frutos de genótipos melhorados de mamoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 3, p. 297-303, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632015v4535008>.

VITORINO, H. S.; MARTINS, D.; MARQUES, R. P. GARBIATE, M. V. Effect of water deficit on the efficiency of herbicides and biochemical characteristics of hair beggarticks. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 5, p. 692-698, 2012.

XU, W.; CUI, K.; XU, A.; NIE, L.; HUANG, J.; PENG, S. Drought stress condition increases root to shoot ratio via alteration of carbohydrate partitioning and enzymatic activity in rice seedlings. **Acta physiologiae plantarum**, v. 37, p. 9, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1760-0>

YEMM, E. W.; COCKING, E. C.; RICKETTS, R. E. The determination of amino-acids with ninhydrin. **Analyst**, v. 80, n. 948, p. 209-214, 1955.

ZHANG, L. X.; LAI, J. H.; LIANG, Z. S.; ASHRAF, M. Interactive effects of sudden and gradual drought stress and foliar-applied glycinebetaine on growth, water relations, osmolyte

accumulation and antioxidant defence system in two maize cultivars differing in drought tolerance. **Journal Agronomy Crop Science**, v. 200, n. 6, p. 425-433, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12081>.

ZHANG, Q.; LIU, J.; LU, H.; ZHAO, S.; WANG, W.; DU, J.; YAN, C. Effects of silicon on growth, root anatomy, radial oxygen loss (ROL) and Fe/Mn plaque of *Aegiceras corniculatum* (L.) Blanco seedlings exposed to cadmium. **Environmental Nanotechnology, Monitoring e Management**. v. 4, p. 6–11, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2015.04.001>.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n. 2, p. 455-472, 2014.. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>.

ZHU, Y.-X.; XU, X.-B.; HU, Y.-H.; HAN, W.-H.; YIN, J.-L.; LI, H.-L., et al. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. **Plant Cell Reports**, v. 34, p. 1629–1646, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1814-9>.