

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

SILÍCIO COMO MITIGADOR DA DEFICIÊNCIA DE
POTÁSSIO EM FEIJOEIRO

Marcilene Machado dos Santos Sarah
Engenheira Agrônoma

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO COMO MITIGADOR DA DEFICIÊNCIA DE
POTÁSSIO EM FEIJOEIRO**

Marcilene Machado dos Santos Sarah
Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

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

2018

Sarah, Marcilene Machado dos Santos
S243s Silício como mitigador da deficiência de potássio em feijoeiro /
Marcilene Machado dos Santos Sarah. -- Jaboticabal, 2018
iii, 43 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018
Orientador: Renato de Mello Prado
Banca examinadora: Cid Naudi Silva Campos, Priscila Lupino
Gratão
Bibliografia

1. Desordem nutricional. 2. Elemento benéfico. 3. Estresse abiótico.
4. Nutrição de plantas. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4:633.35

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

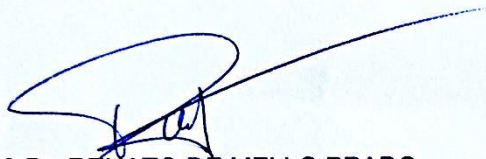
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SILÍCIO COMO MITIGADOR DA DEFICIÊNCIA DE POTÁSSIO EM FEIJOEIRO

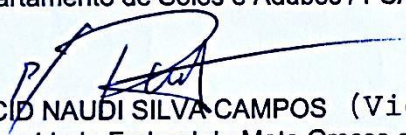
AUTORA: MARCILENE MACHADO DOS SANTOS SARAH

ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

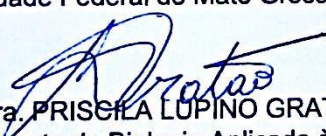
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Dr. CID NAUDI SILVA CAMPOS (Videoconferência)
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul / UFMGS-Chapadão do Sul/MS



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

Jaboticabal, 08 de junho de 2018

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Marcilene Machado dos Santos Sarah nasceu em Belém– PA, Brasil em 18 de março de 1993, filha de Valquíria Machado dos Santos e Alex Carvalho Sarah. Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, no Câmpus de Belém (2016). Em 2012, durante a graduação, fez parte da Empresa Júnior de Agronomia-ECONAGRA, e no mesmo ano foi admitida como bolsista do laboratório de fitopatologia na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA, onde trabalhou com fungos patogênicos na cultura do açaizeiro. Em 2013, foi aprovada no processo seletivo do Programa de Educação Tutorial em Ciência do Solo- PET Solos, no qual foi bolsista durante três anos, desenvolvendo trabalhos na área de ciência do solo e educação ambiental. Em 2015, foi uma das fundadoras do Grupo de Estudos em Nutrição da Palma de Óleo- NUTRIPALMA/UFRA, que tem como finalidade desenvolver e difundir o conhecimento técnico científico sobre a cultura da palma de óleo no estado do Pará. Em 2016, foi admitida para o curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, sendo bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, e integrante do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da UNESP (GENPLANT), onde desenvolveu pesquisas na área de nutrição de plantas, especialmente sobre adubação silicatada em grandes culturas.

“Não são as perdas nem as quedas que podem fazer fracassar nossas vidas, senão a falta de coragem para levantar e seguir adiante.”

(Samael Aun Weor)

Dedico este trabalho a Deus, e à minha querida e amada mãe, Valquíria Santos, por sempre me apoiar e acreditar em mim. Obrigada!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por toda força que me concedeu nos momentos de dificuldade e também nos de alegria ao longo dessa caminhada.

À minha mãe querida, Valquíria Machado dos Santos, por sempre acreditar em mim, me incentivar e sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, rezando, me apoiando e me acolhendo quando eu sempre precisei.

Ao meu pai e madrastra, Alex Sarah e a Ariadne Sarah, e aos meus irmãos Ramon Sarah e Alexia Sarah por me apoiarem e se orgulharem de mim.

Ao meu orientador Renato de Mello Prado, pelos ensinamentos, pela confiança depositada em mim, pela disponibilidade de sempre me atender, ajudar e sanar minhas dúvidas ao longo de minha pesquisa.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade, e por ter me acolhido durante o mestrado, me propiciando experiências e oportunidades inesquecíveis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pelas oportunidades concedidas quanto a realização do curso de mestrado, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa concedida.

À banca avaliadora da defesa, Dr. Cid Campos e Dra. Priscila Gratão, e também a banca de qualificação, Dra. Denise Chiconato e Dr. Fábio Mingotte, pela disponibilidade e contribuições em minha pesquisa.

Ao meu namorado Robson Medeiros, pelo amor, apoio e paciência destinados a mim.

Aos amigos de longa data, Gabriela Abbud, Mitri Hage e Luiz Danin por estarem presentes nos momentos mais importantes da minha vida, e que apesar da distância, nunca deixaram de se fazer presentes.

Aos amigos Fernando Moraes, Gelza Teixeira e Jardel Barbosa pelo apoio, ajuda, amizade e carinho cultivados ao longo de nossa estadia em Jaboticabal.

À Lana, minha grande amiga, que sempre esteve ao meu lado nos momentos de angústia e também de felicidade.

Aos amigos que a UNESP me concedeu: Jonas Souza, Rafael Barreto, Luiz Cláudio, Guilherme Felisberto, Kamilla Oliveira, Márcia Masson, Edilaine Traspadini, Bruno Sousa, Sabrina Nascimento, Alexson Dutra, Gustavo Moura, Patric Alves, Diogo Alves, Wallace Leite, Ezequias Correia, Gustavo André, Camila Vieira, Khaterine Batista e Kamila Meneses, pela amizade, bons momentos vividos e conhecimentos compartilhados.

À técnica de laboratório de solos e adubos, Cláudia Dela Marta, e à técnica do laboratório de fisiologia vegetal, Sônia Carregari, por todo apoio, paciência e ensinamentos transmitidos durante a condução de minhas análises.

Aos professores Renato Prado, Arthur Bernardes, Mara Cruz, Priscila Gratão e Pedro Alves, que proporcionaram o enriquecimento dos meus conhecimentos ao longo das disciplinas cursadas no mestrado.

Aos meus eternos orientadores, Mário Lopes e Ana Regina, por terem sido a base do meu crescimento científico e profissional, pelo qual eu serei eternamente grata.

Ao Programa de Educação Tutorial em Ciência do Solo, que me deu a oportunidade de crescimento profissional, e de viver experiências indescritíveis ao lado dos meus amigos de trabalho Fernando Favacho, Ariadne Trindade, Ana Renata, Maynara Santos, Larissa Miranda, Amanda Castro, Ismael Soares, Maria Cardoso, Dryelle Oliveira, Yan Nunes, Pedro Miranda, Enilde Aguiar, Kelly Christina, Diego Barreiros, Mila Façanha, Sheyla Souza, Vivian Rocha, Kleve Canteral e Manuela Raiol.

Ao Grupo de Estudos em Nutrição da Palma de Óleo - NUTRIPALMA, pelo crescimento profissional e amizades cultivadas.

À turma A Agronomia 2011 da UFRA/Belém, em especial a “equipe forte” Aline Richart, Anderson Nunes, Antonio Macedo, Hamilton Neto, Marcela Lourinho, Vanessa Cosme e Orlando Maciel pela força e incentivo. Ao lado de vocês me tornei mais forte e persistente para alcançar meus sonhos.

Aos meus amados amigos, Jéssica Vasconcelos, Alexandre Rosa, Madson Maciel, Larissa Húrsula, Rubia Dantas, Taise Carvalho, Patrick Castelo, pelos momentos de alegria.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Importância nutricional do potássio nas plantas.....	3
2.2. Silício: fontes e formas de aplicação	4
2.3. Silício e a mitigação dos estresses por deficiência de potássio em plantas...	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1. Condições gerais de cultivo	11
3.2. Primeiro experimento: fontes e concentrações de Si aplicado via foliar.....	11
3.2.1. Avaliações do primeiro experimento.....	13
3.3. Segundo experimento: formas de fornecimento de Si e a mitigação da deficiência de K em feijoeiro	14
3.3.1. Avaliações do segundo experimento	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1. Fontes e concentrações de Si aplicadas via foliar	19
4.2. Formas de fornecimento de Si e a mitigação da deficiência de K em feijoeiro	23
5. CONCLUSÕES	34
6. REFERÊNCIAS	35
APÊNDICE.....	41

SILÍCIO COMO MITIGADOR DA DEFICIÊNCIA DE POTÁSSIO EM FEIJOEIRO

RESUMO - A deficiência oculta de potássio (K) é comum em feijoeiro, mas o silício (Si) quando fornecido via solução nutritiva (raiz) ou via foliar pode aliviar os estresses ocasionados pela deficiência deste nutriente, entretanto, isso ainda não é conhecido nesta espécie. A partir disso, objetivou-se verificar a melhor fonte e concentração de Si aplicado via foliar, e se essa fonte fornecida via solução nutritiva e foliar é eficiente em mitigar os estresses por deficiência de potássio em feijoeiro. Para isso, foram desenvolvidos dois experimentos em casa de vegetação com plantas de feijão cultivadas em sistema hidropônico. Um estudo preliminar visou definir a melhor fonte e concentração de Si aplicados via foliar. O segundo experimento foi em esquema fatorial 2x3, com solução nutritiva deficiente ($0,2 \text{ mmol L}^{-1}$ de K) e suficiente (6 mmol L^{-1} de K) em potássio, e o fornecimento de Si foi via solução nutritiva (2 mmol L^{-1} de Si), foliar ($5,36 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si) e controle (0 mmol L^{-1} de Si), disposto em delineamento inteiramente casualizado, em 4 repetições. Foram avaliados parâmetros fisiológicos, nutricionais e crescimento das plantas. E verificou-se que a pulverização foliar com Si foi viável agronomicamente para o feijoeiro, destacando-se o silicato de sódio e potássio estabilizado na concentração de $5,36 \text{ mmol L}^{-1}$. A deficiência de K causou prejuízo no desenvolvimento das plantas de feijão que não receberam Si. O Si mitigou estresses por deficiência de K no feijoeiro devido a melhoria das variáveis nutricionais, fisiológicas e de crescimento, destacando-se o fornecimento de Si via solução nutritiva em relação a via foliar, embora essa última forma de aplicação do elemento benéfico também atenuou os efeitos da deficiência do macronutriente.

Palavras chave: desordem nutricional, elemento benéfico, estresse abiótico, nutrição de plantas

SILICON AS A POTASSIUM DEFICIENCY MITIGATOR IN COMMON BEAN

ABSTRACT - Undetected potassium (K) deficiency is common in bean plants. Although silicon (Si) supplied via nutrient solution (roots) or foliar application may alleviate the resulting stress, it remains unknown in this species. This pioneering study aimed to determine the best source and concentration of leaf-applied Si, and whether providing it via nutrient solution and foliar application is efficient in alleviating K deficiency stress in bean plants. To that end, two experiments were conducted in a greenhouse with bean plants grown in a hydroponic system. Due to the lack of reliable information for the bean plant, a preliminary study aimed at determining the best leaf-applied source and concentration of Si. The second experiment used a completely randomized 2x3 factorial design, with deficient (0.2 mmol L^{-1} of K) and sufficient potassium solution (6 mmol L^{-1} of K), Si supplied via nutrient solution (2 mmol L^{-1} of Si), foliar application (5.36 mmol L^{-1} of Si) and controls (0 mmol L^{-1} of Si), and 4 repetitions. Physiological, nutritional and plant growth parameters were measured. Foliar spraying with Si was agronomically feasible for the bean plant, with silicate of sodium and potassium stabilized at a concentration of 5.36 mmol L^{-1} . K deficiency without the addition of Si compromised plant growth. Si mitigated K deficiency stress in the bean plant due to enhanced nutritional, physiological and growth variables, underscoring Si supply via nutrient solution over foliar application, although the latter also attenuated K deficiency. .

Keywords: abiotic stress, beneficial element, nutritional disorder, plant nutrition

1. INTRODUÇÃO

A deficiência de K em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é comum em diversas regiões de cultivo no mundo, induzindo clorose nas bordas das folhas mais velhas, que pode evoluir para necrose. Neste estágio ocorre a degradação da clorofila dado o aumento dos teores de putrescina, diminuindo a fotossíntese, e aumentando a transpiração, tendo baixa eficiência do uso da água (PRADO, 2008; CHEN et al., 2016ab).

Estudos apontam que o uso do elemento benéfico Si pode mitigar estresses por deficiência de K, pois proporciona o aumento dos teores de clorofila e carotenoides, favorecendo as taxas fotossintéticas (MIAO; HAN; ZHANG, 2010; CHEN et al., 2016ab), diminuindo a transpiração, aumentando a eficiência de uso de água (MA, 2004; CHEN et al., 2016b) e consequentemente incrementando a produção de matéria seca (MIAO; HAN; ZHANG, 2010; CHEN et al., 2016b).

No entanto, as informações sobre os efeitos do Si e a redução do estresse por deficiência de K nas plantas de feijão não são conhecidas. Existem alguns estudos indicando que o fornecimento de Si via solução nutritiva alivia os sintomas da deficiência de K nas culturas da soja (MIAO; HAN; ZHANG, 2010), sorgo (CHEN et al., 2016ab) e cevada (HOSSEINI et al., 2017), mas não há relatos com a pulverização foliar de Si e essa desordem nutricional em nenhuma espécie. Inclusive, ainda existem dúvidas da melhor fonte e concentração de Si para a pulverização foliar de Si em feijoeiro.

Diante disto, há o questionamento se a pulverização foliar de Si no feijoeiro é viável agronomicamente dependendo da concentração e da fonte do elemento benéfico. A hipótese principal seria se o fornecimento de Si alivia os sintomas da deficiência de K devido o aumento do teor de clorofila, da fotossíntese e da eficiência de uso da água pelo feijoeiro. Se sim, a mitigação de deficiência de K é mais evidente com o fornecimento do Si via solução nutritiva (radicular) comparada

ao foliar, embora a pulverização nas folhas possa atenuar a deficiência do macronutriente em feijoeiro.

A partir disso, objetivou-se verificar a melhor fonte e concentração de Si aplicado via foliar, e se essa fonte quando fornecida via solução nutritiva e foliar é eficiente em aliviar estresses ocasionados pela deficiência de K em feijoeiro.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância nutricional do potássio nas plantas

O potássio é um macronutriente catiônico responsável por ativar mais de 60 enzimas, participando diretamente da síntese proteica e da neutralização de cargas negativas em proteínas (PRADO, 2008; BARKER; PILBEAM, 2015). O K^+ é um contra-íon que atua no fluxo de prótons através das membranas dos tilacoides, necessário para o estabelecimento da síntese de ATP via fotofosforilação (TESTER; BLATT, 1989). Este nutriente é indispensável no processo fotossintético, devido sua atuação na fixação de CO_2 nos cloroplastos e também para o bisfosfato de ribulosecarboxilase (PEOPLES; KOCH, 1979).

O K assume importante papel no desenvolvimento vegetal, pois atua nos processos de translocação de carboidratos da parte aérea para as raízes, estimula a regulação osmótica a partir da redução da perda de água por transpiração, equilibrando a abertura e fechamento de estômatos, além de favorecer os processos de captação de água através das raízes, que contribui para o aumento do turgor e expansão celular (PRADO, 2008; JONES JR., 2012; BARKER; PILBEAM, 2015).

Plantas cultivadas em situação de deficiência em K podem apresentar baixa absorção de água e consequente desregulação osmótica (PRADO, 2008; CHEN et al. 2016b), que pode ser justificado devido a deficiência em K reduzir a atividade das aquaporinas, proteínas presentes na membrana, que formam poros facilitadores do transporte hídrico, respondendo por parte da absorção de água das plantas (KRUSE; UEHLEIN; KALDENHOFF, 2006; KANAI et al. 2011; CHEN et al., 2016b).

Além disso, plantas em estágios mais avançados da deficiência de K apresentam sintomas visíveis do estresse inicialmente nas folhas mais velhas, sendo comum o aparecimento de clorose nas bordas, seguida por necrose (JONES JR., 2012; BARKER; PILBEAM, 2015). Há uma redução no comprimento de raízes devido ao baixo fornecimento de carboidratos pela parte aérea (MIAO; HAN; ZHANG, 2010; JONES JR., 2012). As plantas podem apresentar maior sensibilidade ao aparecimento de doenças, ocasionado por um aumento da concentração de

carboidratos solúveis, e também pelos altos teores de NH_4^+ (PRADO, 2008; BARKER; PILBEAM, 2015).

Como resposta à deficiência de potássio em plantas, há diminuição do metabolismo vegetal, resultando em baixo rendimento produtivo (JONES JR., 2012; BARKER; PILBEAM, 2015). No caso do feijoeiro, tanto o desenvolvimento da cultura, como a produção vagens por planta é reduzido (PRADO, 2008). Dantas et al. (1979), observando os efeitos da omissão de potássio em feijão caupi (*Vigna unguiculata*), perceberam que as plantas apresentaram volume de raízes, crescimento do caule, área foliar e o número de folhas reduzidas quando comparados ao tratamento suficiente no macronutriente.

A deficiência nutricional por K em plantas leva a estresses bioquímicos, fisiológicos e morfológicos, que implicam em baixa produção de biomassa (PRADO, 2008). Entretanto, esses efeitos deletérios podem ser amenizados a partir de alternativas como a aplicação de elementos atenuadores, a exemplo do silício (MIAO; HAN; ZHANG, 2010; CHEN et al., 2016ab; HOSSEINI et al., 2017). Estudos mostram os efeitos benéficos do Si na redução de estresses abióticos (MA, 2004), e na viabilização produtiva de culturas do grupo das leguminosas como amendoim, feijão e soja (CRUSCIOL et al., 2013), e feijão caupi (*Vigna unguiculata*) (MALI; AERY, 2009; 2008).

2.2. Silício: fontes e formas de aplicação

O Si é largamente utilizado na agricultura (DATNOFF; SNYDER; KORNDÖRFER, 2001), entretanto, apesar da disponibilidade de diversas fontes no mercado, a sua aplicação é comumente realizada através de uso de escórias de siderurgias como os silicatos de cálcio adicionados via solo (PRADO; FERNANDES, 2001), porém, esse produto possui baixa solubilidade em água (SOUSA et al., 2010), e segundo Zanão Jr. (2007), dependendo da concentração ministrada, pode haver ausência de resposta ao Si, e em alguns casos como os citados por Birchall (1995), o produto pode polimerizar, formando partículas coloidais de sílica hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Por outro lado, a utilização de fontes como silicato de potássio pode potencializar o aproveitamento do elemento pelas plantas. Os silicatos de potássio são totalmente solúveis em água, com pH elevado, podendo ser encontrados no mercado diferentes tipos do produto, com diferentes garantias de concentrações de potássio (K) e Si (FREITAS et al., 2011).

Além disso, novos produtos a base de Si estão sendo testados, a exemplo de fontes estabilizadas, como o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, que se diferenciam das outras devido a presença de sorbitol em sua composição. O sorbitol é um poliálcool que proporciona maior estabilidade na solução, retardando taxa de polimerização do elemento (KUBICKI; HEANEY, 2003) na superfície foliar, e com diminuição do valor pH, pode conter espécies monoméricas de Si (ácido silícico).

A fonte de silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol possui pH 11,8 e índice salino menor que o silicato de sódio puro e valor menor quando comparado ao silicato de potássio, apresentando características intermediárias entre as duas fontes solúveis. Segundo Crusciol et al. (2013), as fontes de Si estabilizadas fornecem o ácido monossilícico, forma absorvida pelas plantas, o que leva a redução dos gastos de energia nesse processo.

A absorção do ácido monossilícico (H_4SiO_4) pelas raízes é realizada pelas membranas das células epidérmicas, ocorrendo de acordo com o gradiente de concentração celular e do meio externo. Esse processo pode ocorrer via apoplasto ou simplasto, através de difusão ativa ou por canais de entrada de água (RAVEN, 2001). O aumento da concentração de Si externa favorece os teores do elemento na endoderme, podendo ocorrer pela camada de suberina, ou por transportadores de silício (RAVEN, 2001). Já o transporte via apoplasto pode ocasionar a retenção de Si devido a saturação de seus transportadores responsáveis pela entrada e saída deste elemento nas células, assim, havendo gasto de energia nas células corticais da raiz, prejudicando o transporte radial (RAVEN, 2001; WIESE; NIKOLIC; RÖMHELD, 2007).

Espécies como as monocotiledôneas fazem absorção de silício de forma ativa com ajuda de transportadores específicos. Já as dicotiledôneas, a exemplo das leguminosas fazem absorção de forma passiva (MA; MIYAKE; TAKAHASHI, 2001). Porém, Raven (2001) cita que a absorção ativa já foi demonstrada para algumas espécies, incluindo as do gênero *Phaseolus* (leguminosa).

A absorção do Si pelas plantas pode ser afetada pelas fontes como também pelas formas de aplicação do elemento (CRUSCIOL et al., 2013). Na literatura, a maioria dos trabalhos fazem uso de Si pela via radicular, sendo comum o fornecimento de 2 mmol L⁻¹ de Si via solução (MIAO; HAN; ZHANG, 2010). Entretanto, para algumas espécies de plantas, a aplicação de Si via radicular em cultivo de solo pode apresentar barreiras como uma absorção radial dificultada (MA; MIYAKE; TAKAHASHI, 2001), a exemplo das não acumuladoras como as leguminosas, que concentram o Si nas raízes, tendo baixo transporte para parte aérea (RAVEN, 2001; CARNEIRO et al., 2010). Implicando em absorção considerada “rejeitiva” nas plantas (KORNDORFER; DATNOFF, 2000).

Quando absorvido, o Si pode ser transportado por um longo percurso da raiz até a parte aérea, e no caso de culturas como as leguminosas, que são não acumuladoras de Si, o efeito deste elemento será mais observado nas variáveis fisiológicas do que físicas, e para isso, o Si deve ser transportado ao citosol, processo que pode ocorrer através da difusão e fluxo de massa, porém sendo mais comum o último (RAVEN, 2001).

A partir disso, a execução de experimentos com finalidade de avaliar novas vias de fornecimento do Si, a exemplo da foliar, podem apresentar vantagens como redução dos gastos com os produtos, pois são utilizadas concentrações reduzidas do elemento, proporcionando maior eficácia no aproveitamento do material. Outro ponto positivo é que o uso do Si em solução pode ser facilmente adaptado aos pulverizadores, favorecendo a aplicação do produto (FIGUEIREDO et al., 2010; FREITAS et al., 2011). Logo, aplicação foliar, pode facilitar a absorção e consequente utilização desse elemento pelas plantas.

Entretanto, para pulverização foliar ser eficiente, alguns cuidados devem ser tomados quanto a temperatura e umidade do ambiente na hora da aplicação. De acordo com Castro (2009), temperaturas entre 20 a 30 °C e a alta umidade do ar conferem maior absorção de nutrientes pelas folhas, já que possibilitam com que a gota fique por maior tempo na superfície foliar, aumentando o estabelecimento de um filme líquido, reduzindo a taxa de secagem por evaporação. Além disso, a adubação foliar também pode ser favorecida pela utilização de surfactantes, produtos que aumentam a superfície de contato entre a calda pulverizada e a folha, proporcionando maior entrada dos elementos aplicados (PRADO, 2008). Como exemplo de surfactante, podemos citar o sorbitol, produto que além de favorecer a absorção foliar, confere maior estabilidade da calda pulverizada (KUBICKI; HEANEY, 2003).

Os estudos sobre o efeito da pulverização foliar de Si vêm apresentando bons resultados, como os realizados por Jafarei, Tabrizi e Bybordi (2015), que ao tratarem plantas de feijão com aplicação via foliar nas concentrações de 2 e 4 ml L⁻¹ de Si observaram aumento da área foliar, teor de clorofila das folhas e consequente incremento no crescimento das plantas e na produção de grãos.

Autores como Crusciol et al. (2013) também relatam os efeitos benéficos do Si na fonte de ácido monosilícico estabilizado com PEG aplicado pela via foliar nas culturas da soja, feijão e amendoim, no qual foi verificado um incremento nos teores de Si, que levou a um aumento na produção de vagens e na produtividade de grãos das culturas estudadas, provando a viabilidade agrônômica dessa forma de fornecimento do elemento benéfico.

As diferentes fontes e formas de aplicação de Si em plantas podem influenciar no maior acúmulo do elemento, efeito que resultará em maior potencial de mitigação de estresses abióticos a exemplo dos ocasionados por desregulação nutricional, como a deficiência de K.

2.3. Silício e a mitigação dos estresses por deficiência de potássio em plantas

O silício é considerado um elemento benéfico às plantas, sendo absorvido na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) pelas raízes (EPSTEIN, 1999). A absorção de elemento é intensificada quando a planta encontra-se sob estresses, sendo estimulada como forma de defesa contra interferências bióticas ou abióticas. Esse processo favorece a absorção, o transporte e até a redistribuição deste elemento a fim de elevar a tolerância vegetal (MA, 2004; MA; YAMAJI, 2006).

Estudos comprovam que a absorção de Si tem favorecido o fortalecimento estrutural de espécies vegetais (EPSTEIN, 1999). Uma explicação para o aumento dessa resistência é que quando absorvido pelas plantas, acumula-se na parede celular e nos espaços intercelulares na forma de sílica amorfa (MA, 2004; MA; YAMAJI, 2006). Na epiderme celular, esse elemento une-se à celulose, podendo estar presente nos estômatos, nos tricomas e nos elementos de vasos (PIPERNO, 1988; MA; YAMAJI, 2006), resultando em fortalecimento do vegetal que consequentemente ajudará a mitigar os estresses ocasionados por fatores abióticos.

A maior resistência conferida pelo Si aos vegetais deve-se não somente ao fortalecimento físico (MA, 2004), mas também ao estímulo nos processos bioquímicos e fisiológicos (MIAO; HAN; ZHANG, 2010; CHEN et al., 2016b). Há uma associação indireta da aplicação de Si no aumento dos teores de clorofila (JAFAREI; TABRIZI; BYBORDI, 2015), e das taxas fotossintéticas (ZUCCARINI, 2008; CHEN et al., 2016b). Essas variáveis são favorecidas pelo efeito benéfico do Si, já que o elemento proporciona formação de folhas mais eretas, que irão possibilitar maior absorção de luz (DEREN et al., 1993), além de também ajudar na redução das taxas de transpiração (GAO et al., 2006), e aumentar o conteúdo de água e a absorção de nutrientes pelas plantas (MALI; AERY, 2008).

Em plantas deficientes em nutrientes é desencadeada uma série de distúrbios metabólicos e celulares. Entretanto, os estresses nutricionais podem ser reduzidos pelo Si, que é eficiente em minimizar os efeitos deletérios ocasionados pela deficiência de K, como observado por Miao, Han e Zhang (2010) em mudas de soja que receberam o fornecimento via radicular de 2 mmol L^{-1} de Si na fonte de silicato

de sódio. Os autores citam que o elemento proporcionou maiores comprimentos de raízes, maior concentração de K nas folhas, caules e raízes, além de redução de espécies reativas de oxigênio (ERO) devido ao aumento na atividade de antioxidantes como a superóxido dismutase (SOD EC 1.15.1.1), a catalase (CAT EC 1.11.1.6) e a peroxidase (POD EC 1.11.1.7). O efeito benéfico do Si resultou em melhores valores de massa seca comparado às plantas deficientes no macronutriente não tratadas com o elemento benéfico.

Uma explicação para as plantas deficientes em K tratadas com Si terem apresentado maiores teores de K, e consequente melhor desempenho vegetativo, deve-se ao estímulo do elemento benéfico na atividade da H^+ -ATPase das membranas, bombas de prótons que estão diretamente ligada à absorção de K nos vegetais (LIANG, 1999).

O efeito benéfico do Si também foi verificado por Chen et al. (2016b), em plantas de sorgo cultivadas em solução deficiente em K. Os autores relatam que o fornecimento radicular de 1 mmol L^{-1} de Si na forma de H_2SiO_3 propiciou melhor desenvolvimento das plantas e maiores taxas de atividade fotossintética. Houve também um aumento nos teores de potássio no xilema, fato que pode ter contribuído no aumento da condutividade hídrica nas plantas, melhorando a absorção de água e seu transporte, comprovando o potencial mitigatório do silício.

O alívio da deficiência de K em plantas tratadas com Si também pode ser justificado pelo elemento aperfeiçoar o transporte hídrico na raiz através de um aumento na atividade das aquaporinas, responsáveis pelo transporte hídrico em plantas, e que podem ter a expressão de seus genes (PIPs) estimulada pelo Si (CHEN, et al., 2016b). De acordo com Chen et al. (2016b), o silício pode ter ajudado a regular essas proteínas em sorgo cultivado sob situação de deficiência de K, resultando em maior atividade hídrica.

Em outro trabalho realizado por Chen et al. (2016a) em plantas de sorgo, os autores citam que o Si reduz o aparecimento de sintomas visuais da deficiência de K como a clorose e necrose nas folhas mais velhas, devido o efeito benéfico do elemento na redução do acúmulo de putrescina, composto nitrogenado que em altas

concentrações torna-se tóxico aos vegetais (PRADO, 2008). Além disso, as plantas em estresse nutricional tratadas com Si apresentaram maior eficiência do fotossistema II, redução de ERO e aumento dos teores de clorofila em relação ao controle.

A melhora da coloração verde em plantas deficientes em K tratadas com Si também foi obtida em estudos realizados por Hosseini et al. (2017) com plantas de cevada que receberam o fornecimento de 0,5 e 1 mmol L⁻¹ de Si na forma de silicato de sódio, resultando em plantas com maior índice de coloração verde comparado as não tratadas com Si.

O fornecimento de Si pode mitigar os sintomas da deficiência de K em plantas, entretanto, na literatura os trabalhos relacionando Si e K testaram apenas o fornecimento do elemento pela via radicular, e não trazem novidades quanto as fontes utilizadas (MIAO; HAN; ZHANG, 2010; CHEN et al., 2016ab; HOSSEINI et al., 2017). A partir disso, faz-se necessário ampliar os estudos com novas fontes e vias de aplicação do elemento, e verificar o potencial mitigatório do Si em plantas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Condições gerais de cultivo

O trabalho foi desenvolvido em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias-FCAV – Câmpus de Jaboticabal-SP.

Foram realizados dois experimentos em sistema hidropônico com plantas de feijão da cultivar BRS Estilo, do grupo comercial carioca. Para o primeiro experimento, visou-se avaliar a melhor fonte e concentração de Si aplicado pela via foliar do feijoeiro. Já no segundo, verificou-se se a fonte que apresentou melhor desempenho no primeiro experimento quando fornecida via foliar e via solução nutritiva foi eficiente em aliviar estresses por deficiência de K em feijoeiro.

3.2. Primeiro experimento: fontes e concentrações de Si aplicado via foliar

O experimento iniciou-se em agosto de 2017, e foi conduzido até o final do ciclo da cultura, que teve duração de 115 dias. Os dados meteorológicos referentes à temperatura máxima, mínima e umidade relativa do ar média foram registrados com uso de termohidrômetro, sendo verificada umidade e temperaturas médias de 34,39% e 31,4 °C respectivamente, e a média das temperaturas máximas de 44,8 °C e a média das mínimas de 17,9 °C (Figura 1).

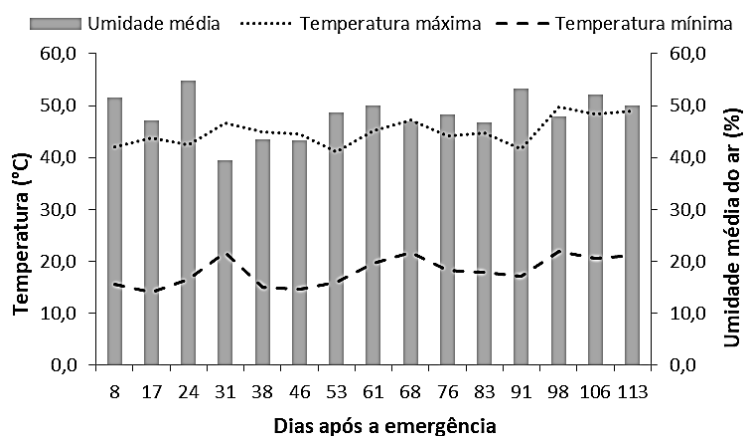


Figura 1. Temperatura mínima, máxima e umidade relativa do ar média, verificada no interior da casa de vegetação durante a condução do experimento.

Para o cultivo, as plântulas com cinco dias após a emergência (DAE) foram transplantadas para vasos de polipropileno com capacidade para 7 dm³ preenchidos com 6 dm³ de areia de textura média previamente lavada com água, solução de HCl a 1% e água deionizada, mantendo-se duas plantas por vaso.

As plantas foram inicialmente irrigadas com 250 ml de água deionizada, e após o transplante, forneceu-se diariamente 500 ml de solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) com modificação na fonte de ferro de Fe-EDTA para Fe-EDDHMA. A concentração da solução nutritiva durante primeira e segunda semana de cultivo foi mantida a 10 e 25% da concentração, respectivamente. Da terceira semana até o fim do experimento, a concentração foi elevada para 50%, mantendo-se o valor pH da solução entre 5,5 e 6,5.

O experimento foi delineado em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram um esquema fatorial 2x4, constituído pelas fontes de Si: silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol - SiALC (113,4 g L⁻¹ de Si e 18,9 g L⁻¹ de K₂O com pH 11,8) e silicato de potássio - SiK (padrão) (128 g L⁻¹ de Si e 126 g L⁻¹ de K₂O com pH 12) e pelas concentrações de Si: 0; 5,36; 10,71 e 16,07 mmol L⁻¹ aplicados via foliar.

Para as aplicações de Si nas fontes de SiALC e SiK via foliar, as pulverizações foram distribuídas em três estádios de desenvolvimento: V4 (emissão da 3ª folha trifoliada), R6 (floração - abertura da primeira flor) e R7 (formação de vagens). O volume de calda aplicada variou de acordo com o tamanho das plantas, sendo pulverizado 8; 16 e 24 ml da solução nos estádios V4, R6 e R7 respectivamente.

A calda com Si para pulverização foliar foi ajustada com solução de NaOH e HCl para manter o valor pH 6,0 ± 0,2. Após as pulverizações com Si, foram realizadas aplicações foliares com cloreto de potássio (KCl), com finalidade de ajustar o K contido nas fontes, mantendo assim o equilíbrio do K em todos os tratamentos.

Antes da realização das aplicações do Si via foliar, a superfície do vaso foi coberta com algodão para evitar com que a calda aplicada nas folhas escorresse para o substrato e entrasse em contato com as raízes, garantindo assim que o Si fosse absorvido unicamente pela via foliar. A temperatura do ar no momento das aplicações situava-se entre 19 e 22 °C e a umidade relativa entre 60 e 80%.

3.2.1. Avaliações do primeiro experimento

Durante o estágio R8, utilizando-se o terceiro trifólio do terço superior da folha, estimou-se a eficiência quântica do fotossistema II (EQFII), mensurado pelo Fluorometro (Opti-Science® - Os30P+).

Os teores de clorofila total (a + b) foram determinados a partir da retirada de 0,014 g de amostras frescas do terceiro trifólio do terço superior da folha. As amostras foram adicionadas em tubos Eppendoff® contendo 1,5 ml de acetona a 80%, permanecendo até que a folha apresentasse coloração esbranquiçada. Em seguida, as amostras foram medidas em espectrofotômetro por absorbância 663 nm, 647 nm e 470 nm. As concentrações de clorofila e carotenoides foram determinadas seguindo a metodologia de Lichtenthaler e Wellburn (1983), a partir das equações:

$$\text{Clorofila } a \text{ (mg g)} = \frac{(12,72 \times OD_{663} - 2,59 \times OD_{647})V}{1000W}$$

$$\text{Clorofila } b \text{ (mg g)} = \frac{(22,88 \times OD_{647} - 4,67 \times OD_{663})V}{1000W}$$

$$\text{Carotenoides (mg g)} = \frac{((1000 \times OD_{470} - 3,27 \times Chl\ a - 104 \times Chl\ b)/229)V}{1000W}$$

**Onde V é o volume total de extrato de acetona (ml) e W é o peso fresco (g) da amostra.

Ao fim do ciclo da cultura, as plantas foram cortadas e lavadas na sequência com água corrente, solução detergente (0,1%), solução de ácido clorídrico (0,3%) e água deionizada. Após a lavagem, as amostras foram acondicionadas em

embalagens de papel e levadas à estufa de circulação de ar forçada em temperatura de $65^{\circ}\text{C} \pm 5$, até atingir massa constante. Após secas, foram obtidas as massas de matéria seca da parte aérea, e em seguida foram moídas em moinho tipo Wiley.

A partir das amostras moídas, determinou-se o teor de Si segundo método descrito por Korndörfer et al. (2004), e calculou-se o acúmulo de Si relacionando o teor do elemento e a massa seca das plantas.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e quando significativo, ao estudo de comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), e para as concentrações, ao estudo de regressão. As análises foram realizadas utilizando o software Agroestat® (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2010).

3.3. Segundo experimento: formas de fornecimento de Si e a mitigação da deficiência de K em feijoeiro

O experimento se iniciou em outubro de 2017, e foi finalizado após o aparecimento dos sintomas de deficiência de K, correspondendo ao estágio R5.

Os dados meteorológicos referentes à temperatura máxima, mínima e umidade relativa do ar média foram registrados com uso de termohidrômetro, verificando-se umidade e temperaturas médias de 33% e 28°C , e a média das temperaturas máximas de 39°C e mínimas de 20°C (Figura 2).

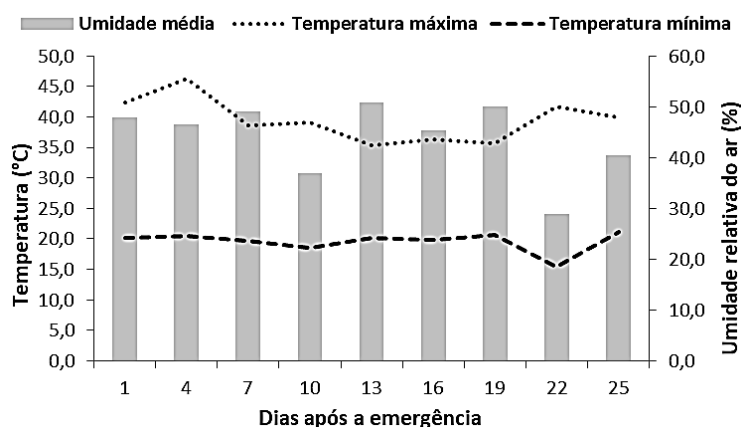


Figura 2. Temperatura mínima, máxima e umidade relativa do ar média, verificada no interior da casa de vegetação durante a condução do segundo experimento.

Para o cultivo do segundo experimento, as plântulas com cinco DAE foram transplantadas para vaso de polipropileno (comprimento: 44 cm; largura: 19 cm e altura: 14 cm) com capacidade para 10 litros de solução nutritiva.

Inicialmente as plantas foram irrigadas com água deionizada, e após o transplântio, forneceu-se solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) com modificação na concentração de K (Tabela 1), e também na fonte de ferro que passou de Fe-EDTA para Fe-EDDHMA. A concentração da solução nutritiva durante primeira e segunda semana de cultivo foi mantida a 10 e 25% da concentração, respectivamente. Da terceira semana até o fim do experimento a concentração foi elevada para 50%, mantendo o valor pH da solução entre 5,5 e 6,5.

O segundo experimento foi disposto em blocos inteiramente casualizados arranjado em esquema fatorial 2x3, sendo duas concentrações de K na solução nutritiva (deficiente e suficiente), e três modos de aplicação do Si (radicular via solução nutritiva (SiRAD), via foliar (SiFOL), e controle(-Si)) (Tabela 1).

Tabela 1. Disponibilidade de K na solução nutritiva e modos de aplicação de Si em plantas de feijão.

plantas de feijão:			
Tratamento	Modos de aplicação	Si	K
		-----mmol L ⁻¹ -----	
Deficiente em K	- Si (controle)	-	
	Foliar	5,36*	0,2
	Radicular	2	
Suficiente em K	- Si (controle)	-	
	Foliar	5,36*	6
	Radicular	2	

*Equivalente a 0,15 g L⁻¹ de Si.

Para o fornecimento do Si foi utilizada a fonte silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol – SiALC, e devido a fonte conter 18,9 g L⁻¹ de K₂O, a

aplicação de 2 mmol L⁻¹ de Si pela via radicular acompanhava 0,2 mmol L⁻¹ de K, sendo assim, essa concentração foi determinada para o fornecimento do macronutriente na solução nutritiva, correspondendo ao tratamento K deficiente (-K). Já para o tratamento K suficiente, a concentração de 6 mmol L⁻¹ de K em solução nutritiva foi obtida de acordo com Hoagland e Arnon (1950).

Para os tratamentos com Si pela via foliar, o fornecimento de 5,36 mmol L⁻¹ de Si acompanhava 0,2 mmol L⁻¹ de K, que foram corrigidos para todas as plantas a partir da pulverização foliar com KCl.

A aplicação de Si via radicular foi realizada ao longo de todo experimento junto com a solução nutritiva, já a aplicação foliar foi feita utilizando pulverizador manual, sendo fornecido o volume de 0,56; 0,84; 1,12 e 1,40 ml da solução silicatada por planta aos 8, 13, 18 e 23 DAE. A calda com Si para pulverização foliar foi ajustada com solução de NaOH e HCl para manter o valor pH 6,0 ± 0,2.

Durante as aplicações foliares, a temperatura do ar variou entre 19 e 22 °C e a umidade relativa entre 60 e 80%.

3.3.1. Avaliações do segundo experimento

Aos vinte e cinco dias após a emergência, as avaliações do teor de clorofila total (a + b), carotenoides, taxa fotossintética, transpiração, extravasamento de eletrólitos e conteúdo relativo de água foram realizadas.

As concentrações de clorofila a, b e carotenoides foram determinadas utilizando o terceiro trifólio do terço superior da folha, seguindo o método descrito por Lichtenthaler e Wellburn (1983).

Realizou-se no terceiro trifólio do terço superior da folha a medida da taxa fotossintética e da taxa de transpiração, utilizando o IRGA (Li-6400; LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA) acoplado a uma fonte de luz artificial regulada para fornecer fluxo de fótons fotossinteticamente ativo de 1200 µmol m⁻² s⁻¹ e sob concentração de CO₂ ambiente (400 ± 10 µmol m⁻² s⁻¹). As avaliações foram realizadas entre as 8:00 e

9:00 horas. A eficiência do uso da água (EUA) foi calculada a partir da divisão da taxa de fotossíntese líquida (A) por taxa de transpiração (E).

Para estimar o extravasamento de eletrólitos, retirou-se dez discos (cada 6 mm de diâmetro) de diferentes trifólios previamente higienizados com água deionizada. Em seguida os discos foram adicionados a Beckeres com 20 ml de água deionizada, a temperatura constante de 25 °C. Após 2 horas, a condutividade elétrica inicial (CE1) foi medida usando um condutivímetro portátil. Em seguida, as amostras foram autoclavadas a 121 °C durante 20 minutos a fim de desintegrar os tecidos e liberar todos os eletrólitos. As amostras foram então arrefecidas a 25 °C e a condutividade elétrica final (CE2) foi medida. Estimou-se o extravasamento seguindo a fórmula proposta por Dionisio-Sese e Tobita (1998):

$$IEE(\%) = \frac{CE1}{CE2} \times 100$$

O conteúdo relativo de água nas folhas de plantas foi obtido através da retirada de seis discos (cada 6 mm de diâmetro) de diferentes trifólios para determinação da massa fresca (MF), em seguida os discos foram submersos em água deionizada por 5 horas para obtenção da massa túrgida (MT), e depois levados a estufa por 48 horas para obtenção da massa seca (MS) das folhas, sendo determinado pela seguinte fórmula proposta por González e González-Vilar (2001):

$$CRA(\%) = \frac{MF - MS}{MT - MS} \times 100$$

Realizaram-se as medidas da área foliar a partir do aparelho LI – 3100 AreaMeter®. A análise do sistema radicular foi feita com uso do sistema Delta-TScan e o comprimento mensurado pelo método de Harris e Campbell (1989). Calculou-se a densidade radicular pela razão entre o comprimento radicular e o volume de solução no vaso.

As plantas foram cortadas e separadas em parte aérea e raiz. Posteriormente, as amostras foram lavadas com água deionizada, solução detergente a 0,1%,

solução de HCl a 0,3%, novamente com água deionizada e por fim secas em estufa de circulação de ar forçada a temperatura de $65^{\circ}\text{C} \pm 5$, até atingir massa constante. Após secas, foram obtidas as massas de matéria seca da raiz e da parte aérea, e em seguida as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley.

Nas amostras do tecido vegetal foi determinado o teor de Si e de K segundo método descrito por Korndörfer et al. (2004) e Bataglia (1983), respectivamente. A partir do teor de Si, de K e da massa seca, calculou-se o acúmulo destes elementos na planta inteira (parte aérea e raiz). A eficiência do uso de K foi obtida pela metodologia de Siddiqi e Glass (1981).

Para a análise estatística, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e quando significativo, ao estudo de comparação de médias pelo teste Tukey ($p < 0,05$) a partir do software Agroestat® (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2010).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Fontes e concentrações de Si aplicadas via foliar

Para o acúmulo de Si na parte aérea, não houve interação entre fontes e concentrações, e nem diferença significativa entre as fontes de Si aplicadas via foliar. O silicato de sódio e potássio estabilizado proporcionou máximo acúmulo de Si na concentração de 0,24 g L⁻¹ de Si e o silicato de potássio na concentração de 0,25 g L⁻¹ de Si (Figura 3).

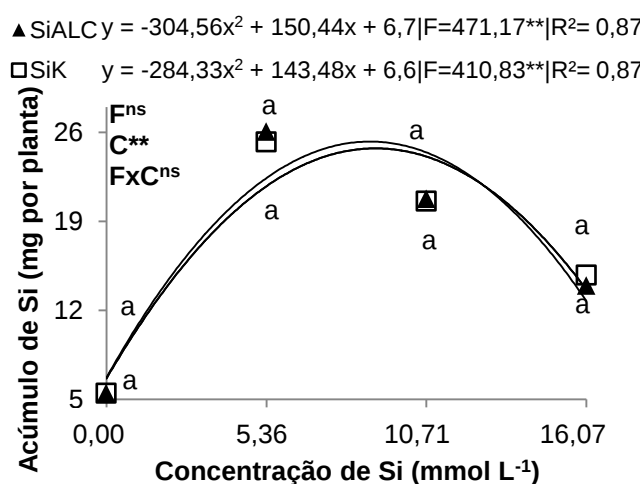


Figura 3. Acúmulo de silício na parte aérea de plantas de feijão em função do aumento das concentrações (C) de silício via foliar nas fontes (F) de silicato de sódio e potássio estabilizado (SiALC) e silicato de potássio (SiK). **Significativo a 1% de probabilidade; Letras diferentes na mesma concentração apresentam diferença entre as fontes ($p < 0,05$, pelo teste de Tukey).

A aplicação foliar de Si pode ser usada como alternativa para aumentar o acúmulo do elemento no feijoeiro, como também observado por Jafarei, Tabrizi e Bybordi (2015), com fornecimento de Si via foliar nas concentrações de 2 e 4 ml L⁻¹, e também por Crusciol et al. (2013) com a aplicação foliar de 2 L ha⁻¹ de silicato ácido estabilizado, no qual ambos autores obtiveram incremento no acúmulo de Si na cultura. Para outras culturas como o quiabeiro, autores como Abbas et al. (2015) verificaram que o fornecimento de 150 mg L⁻¹ de Si também aumentou os teores do elemento na planta.

Para os teores de clorofila total (a + b) em plantas de feijão, não foi observado interação entre fontes e concentrações, porém houve diferença entre fontes, no qual o silicato de sódio e potássio estabilizado proporcionou melhor desempenho, atingindo teor máximo na concentração de 0,29 g L⁻¹ de Si. A fonte silicato de potássio também apresentou máximo teor na concentração de 0,29 g L⁻¹ de Si (Figura 4a).

Para eficiência quântica do fotossistema II, não foi observada interação significativa entre fontes e concentrações, entretanto, o silicato de sódio e potássio estabilizado proporcionou maior eficiência, atingindo máxima na concentração de 0,27 g L⁻¹ de Si, e silicato de potássio na concentração de 0,24 g L⁻¹ de Si (Figura 4b).

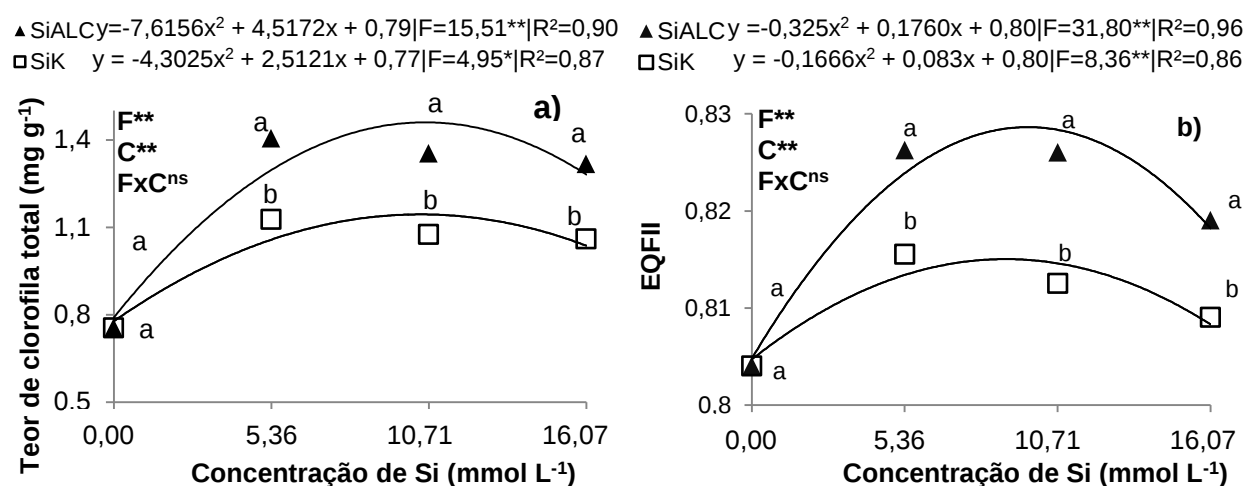


Figura 4. Teor de clorofila total (a) e eficiência quântica do fotossistema II – EQFII (b) de plantas de feijão em função do aumento das concentrações (C) de silício via foliar nas fontes (F) de silicato de sódio e potássio estabilizado (SiALC) e silicato de potássio (SiK). **Significativo a 1% de probabilidade; Letras diferentes na mesma concentração apresentam diferença entre as fontes ($p < 0,05$, pelo teste de Tukey).

O Si fornecido via foliar favorece o incremento dos teores de clorofila em plantas de feijão (Figura 4a), corroborando com os resultados obtidos por Jafarei, Tabrizi e Bybordi (2015) na cultura. Os maiores teores de clorofila total (Figura 4a) e da eficiência quântica do fotossistema II (Figura 4b) favorecida pelo Si via foliar pode estar relacionada ao fortalecimento da parede celular do vegetal, resultando em

plantas mais eretas, que leva a uma maior exposição e aproveitamento da luz solar (PULZ et al., 2008).

Além disso, há uma associação indireta da aplicação do Si no aumento dos teores de clorofila e da eficiência do fotossistema II em plantas, principalmente quando o ambiente apresenta algum estresse ao cultivo (SIVANESAN et al. 2014). Segundo Vieira (1967) a faixa de temperatura ótima de cultivo do feijoeiro situa-se entre 18 a 24 °C, entretanto, a faixa de temperatura verificada ao longo do ciclo da cultura nesse experimento estava acima do limite ótimo (Figura 1), o que pode ter induzido o feijoeiro a possíveis estresses por altas temperaturas. Esse fato pode justificar os melhores desempenhos das variáveis fisiológicas obtidas nesse trabalho, pois se compararmos as plantas cultivadas na concentração de 0,0 mmol L⁻¹ de Si (controle) (Figura 4) as que receberam 5,36; 10,71; 16,07 mmol L⁻¹ de Si via foliar, observamos que houve incremento dos teores de pigmentos e da EQFII devido o fornecimento do elemento.

A redução dos efeitos deletérios ocasionados por altas temperaturas em plantas também foram citados por Sivanesan et al. (2014), que ao aplicarem Si pela via radicular, obtiveram incremento dos teores de clorofila e da eficiência do fotossistema II em samambaias (*Nephrolepis exaltata*).

Além do fator concentração, a fonte de Si também influenciou no melhor desempenho nas variáveis fisiológicas, como observado na fonte de silicato de sódio e potássio estabilizado que proporcionou maiores teores de clorofila e EQFII. Esse efeito deve-se a presença de sorbitol na sua composição, que proporciona maior estabilidade na solução silicatada, retardando taxa de polimerização do elemento (KUBICKI; HEANEY, 2003) na superfície foliar.

Para massa seca da parte aérea, não houve interação entre fontes e concentrações, e nem diferença estatística entre fontes. O valor máximo de massa seca para o silicato de sódio e potássio estabilizado foi atingido na concentração de 0,24 g L⁻¹, e para o silicato de potássio em 0,26 g L⁻¹ (Figura 5).

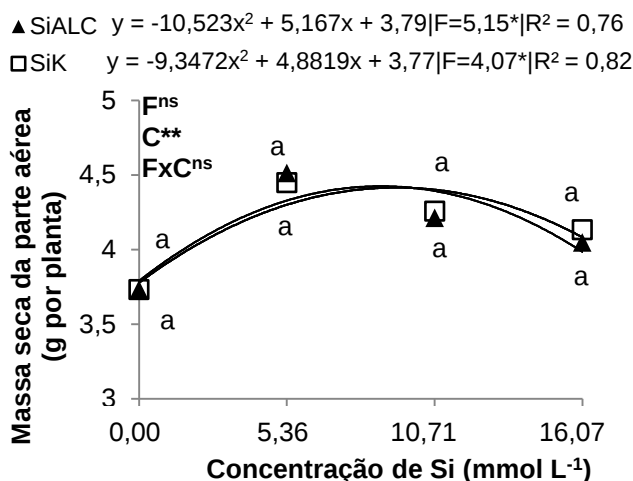


Figura 5. Massa seca da parte aérea de plantas de feijão em função do aumento das concentrações (C) de silício via foliar nas fontes (F) de silicato de sódio e potássio estabilizado (SiALC) e silicato de potássio (SiK). **Significativo a 1% de probabilidade; Letras diferentes na mesma concentração apresentam diferença entre as fontes ($p < 0,05$, pelo teste de Tukey).

O fornecimento de Si pode proporcionar melhorias significativas no desempenho do feijoeiro (MALI; AERY, 2009), como foi observado no presente trabalho pelo aumento na massa seca de plantas como resultado do fornecimento do elemento via foliar em comparação com as plantas controle ($0,0 \text{ mmol L}^{-1}$) (Figura 5). Resultado também citado por autores como Jafarei, Tabrizi e Bybordi (2015) e Crusciol et al. (2013) no incremento na massa seca da cultura do feijão tratada com Si foliar, mostrando o potencial do elemento em favorecer o desenvolvimento vegetal.

A aplicação de Si via foliar foi viável agronomicamente, pois aumenta o acúmulo do elemento na planta (Figura 3), o teor de clorofila (Figura 4a), a eficiência quântica do fotossistema II (Figura 4b) e consequentemente a produção de matéria seca (Figura 5) independente da fonte do elemento.

A partir dos resultados, verificou-se que a fonte SiALC foi semelhante ao SiK para o incremento do elemento na planta (Figura 3), porém a primeira proporcionou melhores resultados nas variáveis teor de clorofila (Figura 4a) e eficiência quântica do fotossistema II (Figura 4b), embora essa diferença não tenha sido suficiente para afetar a matéria seca (Figura 5). O uso desta fonte na concentração de Si igual a

5,36 mmol L⁻¹ de Si esteve associado com 90% da máxima produção de matéria seca, sendo uma opção viável para pulverização foliar do elemento benéfico no feijoeiro.

4.2. Formas de fornecimento de Si e a mitigação da deficiência de K em feijoeiro

O cultivo do feijoeiro em solução nutritiva deficiente em K resultou em menor acúmulo do nutriente, independente dos tratamentos com Si e o controle (-Si) (Figura 6a). Apenas a aplicação de Si via solução nutritiva no feijoeiro cultivado sob deficiência de K comparado ao controle (-Si) aumentou o acúmulo de K (Figura 6a). Nas plantas deficientes em K o fornecimento de Si radicular e foliar em relação ao controle aumentou a eficiência de uso do macronutriente (Figura 6b). Portanto, isso indica efeito benéfico do Si na melhoria da absorção de K e na eficiência de uso do nutriente, fato importante que deve colaborar no alívio do estresse nutricional do feijoeiro.

A baixa concentração de K na solução nutritiva comparado a sua suficiência diminuiu a absorção de Si apenas quando o elemento foi fornecido via solução nutritiva (Figura 6c). O emprego do Si favoreceu o acúmulo de Si em plantas de feijão com e sem deficiência de K, mas destacou-se o fornecimento do elemento via solução nutritiva em relação a foliar (Figura 6c). Isso indica que a planta de feijão tem habilidade muito maior para absorção de Si via radicular que a via foliar, fato que deve refletir na eficiência de mitigação de estresse nutricional.

As plantas de feijão cultivadas em solução nutritiva deficiente em K (0,2 mmol L⁻¹ de K) apresentaram menor acúmulo do nutriente quando comparado com as plantas suficientes, indicando a ocorrência de estresse nutricional (Figura 6a). No entanto, essas plantas deficientes de K quando receberam o silício, sobretudo pela via radicular, em relação ao controle (-Si) apresentaram incremento do acúmulo de K (Figura 6a). Isso possivelmente ocorreu devido o Si estimular as atividade das H⁺-ATPases, enzimas que estão diretamente ligadas à absorção de K pelas plantas (LIANG, 1999). Esse aumento no acúmulo de K em plantas deficientes no nutriente

também foi verificado em sorgo por Chen et al. (2016b) e por Miao, Han e Zhang (2010) em soja que receberam Si via solução nutritiva. Notou-se nas plantas deficientes de K que o fornecimento de Si especialmente via radicular em relação ao controle incrementou a eficiência de uso de K pelo feijoeiro (Figura 6b), devido aos efeitos do Si em aumentar a absorção do elemento (Figura 6a) e possivelmente aos processos fisiológicos associados com a produção de biomassa.

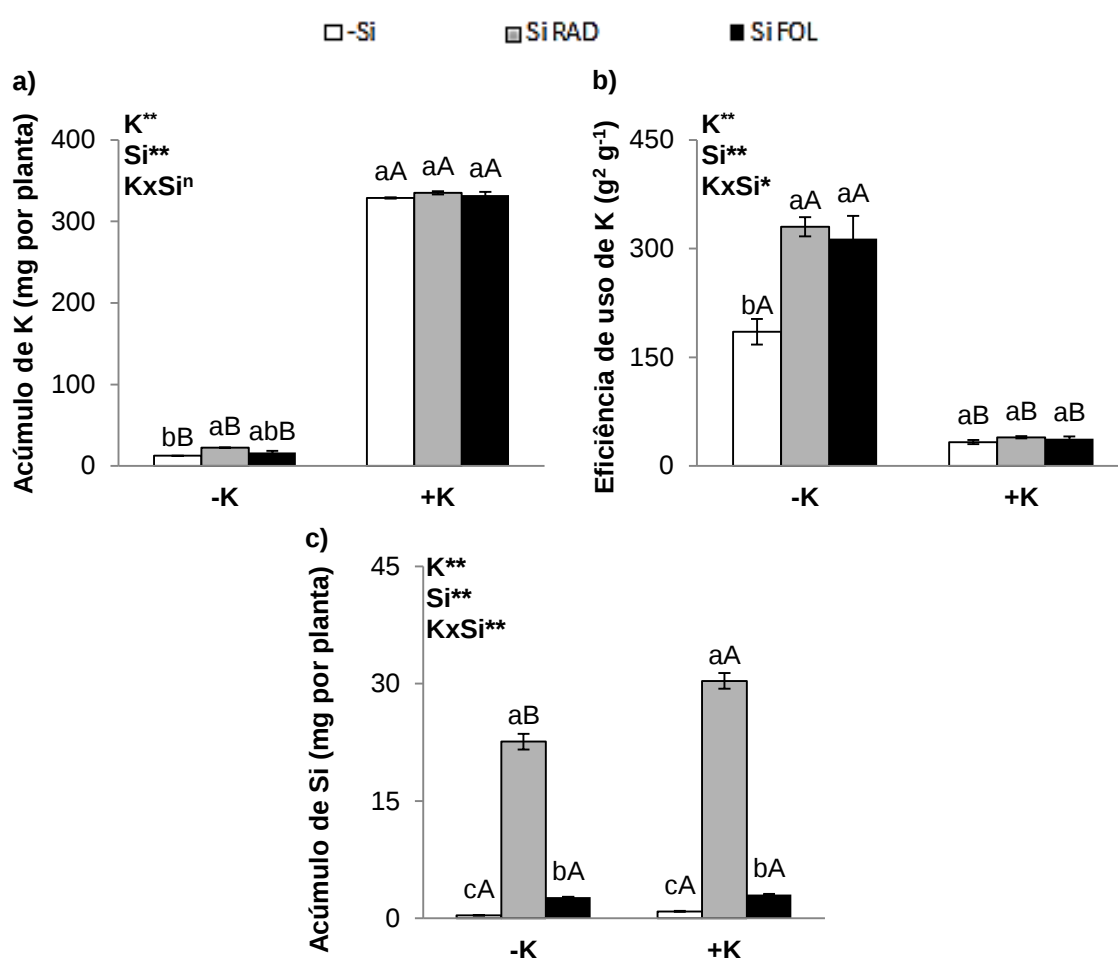


Figura 6. Acúmulo de potássio (parte aérea + raiz) (a), eficiência de uso de potássio (b) e acúmulo de silício (parte aérea + raiz) (c) em plantas de feijão cultivadas sob deficiência (-K) e suficiência (+K) de potássio, e com fornecimento de silício via radicular (Si RAD), via foliar (Si FOL) e controle (-Si). As barras de erro nas figuras representam erro padrão. Letras diferentes, minúsculas entre o modo de fornecimento de Si na mesma disponibilidade de K e as letras maiúsculas entre a concentração de K no mesmo modo de fornecimento de Si, indicam diferenças ($p < 0,05$, pelo teste de Tukey) entre os tratamentos.

A deficiência de K em feijoeiro diminuiu o acúmulo de Si apenas nos tratamentos que o elemento benéfico foi fornecido via radicular (Figura 6c). Portanto, a deficiência de K induz diminuição do acúmulo de Si mesmo nas plantas que receberam o elemento benéfico via solução nutritiva, fato também constatado por Hosseini et al. (2017) em plantas de cevada.

Nota-se que houve maior acúmulo de Si em plantas de feijão quando o elemento foi fornecido pela via solução nutritiva em relação a aplicação foliar, independente da disponibilidade de K (Figura 6c). Isso ocorreu devido o Si ter sido fornecido na solução nutritiva durante todo o ciclo da cultura, enquanto que a aplicação via foliar foi realizada apenas em quatro estádios fenológicos da planta. Observou-se que a aplicação foliar de Si promoveu incremento do acúmulo deste elemento benéfico em relação ao controle (-Si) nas plantas com e sem deficiência de K (Figura 6c). Isto indica que a pulverização foliar foi viável para aumentar a absorção de Si nas plantas de feijão, fato também constatado nas culturas de feijão, soja e amendoim por Crusciol et al. (2013), e em plantas de quiabo por Abbas et al. (2015).

A deficiência de K em relação a suficiência deste nutriente diminuiu o teor de clorofila e o teor de carotenoides apenas nas plantas controle (-Si) e nas que receberam o Si via foliar (Figura 7a, b). Contudo, nas plantas sob deficiência de K o fornecimento de Si via solução nutritiva propiciou maiores teores de clorofila e de carotenoides em relação aos tratamentos via foliar e controle (-Si) (Figuras 7a, b). No entanto, nas plantas suficientes em K apenas o fornecimento do Si via radicular induziu aumento do teor de clorofila e de carotenoides (Figuras 7a, b).

As plantas de feijão cultivadas em solução nutritiva deficiente em K apresentaram clorose seguida de necrose dos bordos das folhas mais velhas. Constatou-se visualmente que esse sintoma foi aliviado pelo fornecimento de Si, com destaque para a via radicular (Figura 7c).

A deficiência de K diminuiu o teor de clorofila e de carotenoide em relação a suficiência do macronutriente apenas nos tratamentos controle (-Si) e Si fornecido via foliar (Figura 7a, b). O cultivo das plantas com baixo teor de K na solução

nutritiva ao diminuir a absorção do elemento (Figura 6a) refletiu na diminuição do teor de clorofila, também constatado por Chen et al. (2016a) em plantas de sorgo. Isso ocorre porque a falta deste nutriente induz estresse dado aumento dos teores de putrecina, composto que em altas concentrações torna-se tóxico as plantas (PRADO, 2008; CHEN et al. 2016a). Diante disso, ficaram evidenciados os sintomas da deficiência de K nas folhas (Figura 7c), que ocasiona clorose e necrose nas bordas das folhas mais velhas (BARKER; PILBEAM, 2015).

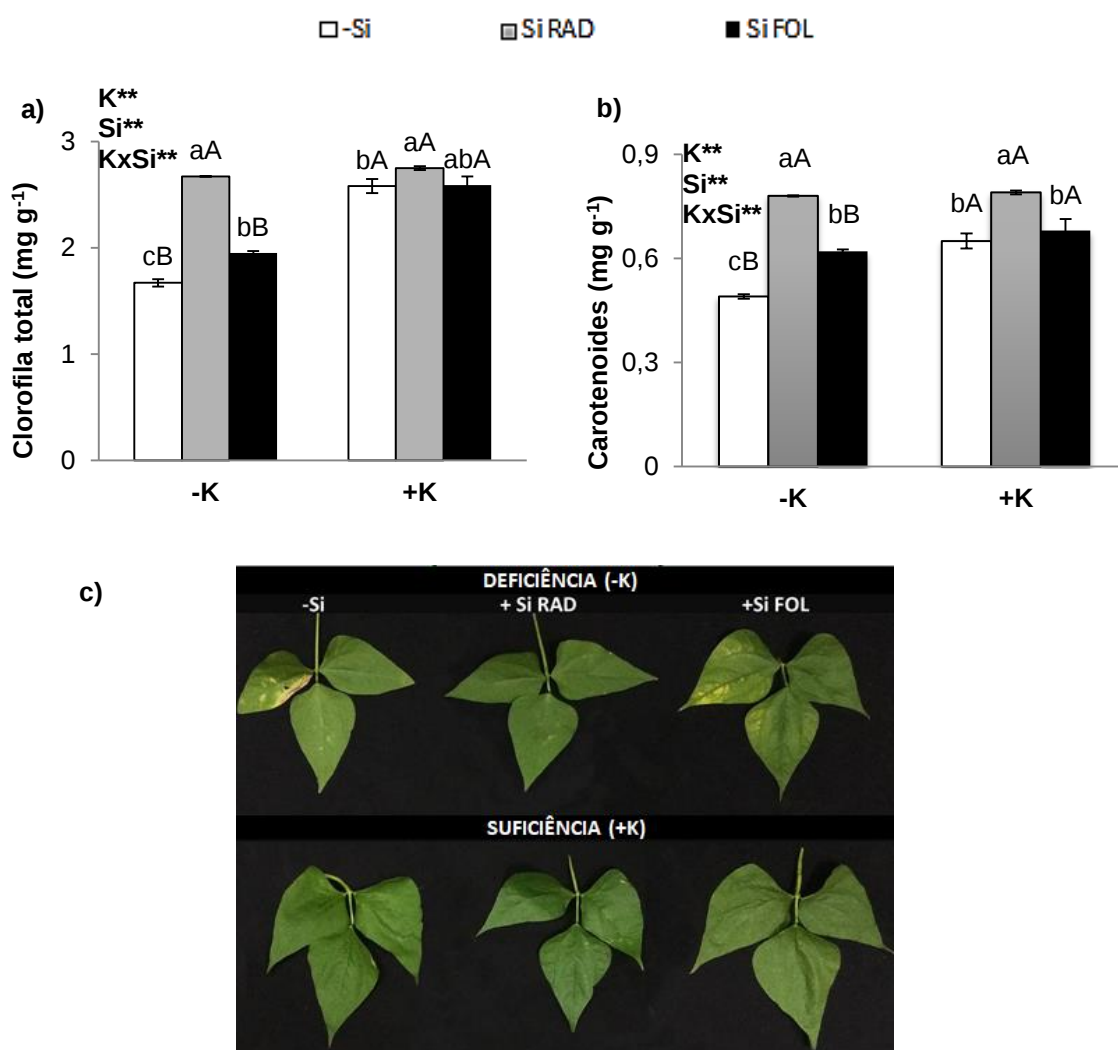


Figura 7. Teor de clorofila total (a+b) (a), carotenoides (b) e clorose no 6º trifólio (c) de plantas de feijão cultivadas sob deficiência (-K) e suficiência (+K) de potássio, e com fornecimento de silício via radicular (Si RAD), via foliar (Si FOL) e controle (-Si). As barras de erro nas figuras representam erro padrão. Letras diferentes, minúsculas entre o modo de fornecimento de Si na mesma disponibilidade de K e as letras maiúsculas entre a concentração de K no mesmo modo de fornecimento de Si, indicam diferenças ($p < 0,05$, pelo teste de Tukey) entre os tratamentos.

Nas plantas sob deficiência de K o fornecimento de Si nas duas formas de aplicação favoreceu o aumento do teor de clorofila e de carotenoides em relação ao controle (-Si), mas destacou-se aplicação de Si via solução nutritiva (Figura 7a, b), diferença que inclusive pode ser observada a olho nu (Figura 7c). O efeito benéfico do Si fornecido via solução nutritiva em plantas deficientes de K no aumento do teor de clorofila foi relatado em outras espécies como sorgo (CHEN et al., 2016a) e em cevada por Hosseini et al. (2017).

A deficiência de K no feijoeiro aumentou o extravasamento de eletrólitos apenas nas plantas controle (Figura 8a) em relação as plantas suficientes no macronutriente. Contudo, o fornecimento de Si, especialmente pela via radicular aliviou o estresse das plantas em deficiência de K, minimizando o extravasamento de eletrólitos.

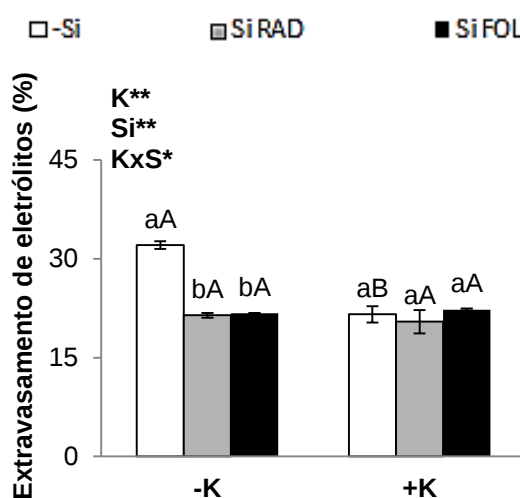


Figura 8. Extravasamento de eletrólitos de plantas de feijão cultivadas sob deficiência (-K) e suficiência (+K) de potássio, e com fornecimento de silício via radicular (Si RAD), via foliar (Si FOL) e controle (-Si). As barras de erro nas figuras representam erro padrão. Letras diferentes, minúsculas entre o modo de fornecimento de Si na mesma disponibilidade de K e as letras maiúsculas entre a concentração de K no mesmo modo de fornecimento de Si, indicam diferenças ($p < 0,05$, pelo teste de Tukey) entre os tratamentos.

A deficiência de K em plantas de feijão sem adição de Si aumentou os índices de extravasamento de eletrólitos em relação às plantas suficientes no macronutriente (Figura 8). Este fato ocorreu porque a deficiência de K diminuiu pH celular, aumentando a atividade de aminas oxidases, que favorecem a oxidação de compostos das membranas celulares (CHEN et al., 2016a). No entanto, as plantas sob deficiência de K tratadas com Si nas duas formas de aplicação apresentaram menor extravasamento de eletrólitos em relação às plantas controle (-Si) (Figura 8). Esse resultado é corroborado por Miao, Han e Zhang (2010) em plantas de soja que receberam Si via solução nutritiva. Este efeito benéfico do Si na diminuição do extravasamento de eletrólitos celular ocorre porque o elemento induz maior proteção da membrana plasmática (MA, 2004), evitando a plasmólise, mantendo a integridade de organelas como cloroplasto, os tilacóides e a lamela da matriz (Ding, 2006). Além disso, houve o aumento nos teores de carotenoides (Figura 7b), componente que pode atuar evitando a formação de oxigênio singlete (1O_2) no fotossistema II. O oxigênio singlete leva a peroxidação de lipídeos, provocando a perda de eletrólitos (JOHNSON et al., 2007; AWASTHI et al., 2015) e da estabilidade da membrana celular (HAVAUX, 1998).

A deficiência de K no feijoeiro reduziu as taxas fotossintéticas (Figura 9a), elevou as taxas de transpiração (Figura 9b) e diminuiu o conteúdo relativo de água (Figura 9c) e a eficiência do uso da água (Figura 9d) em relação as plantas suficientes no macronutriente. Contudo, o fornecimento de Si, especialmente pela via radicular aliviou o estresse das plantas em deficiência de K, pois elevou a fotossíntese, o conteúdo relativo de água, a eficiência do uso da água, além de minimizar as taxas de transpiração.

A deficiência de K em feijoeiro diminuiu as taxas fotossintéticas apenas nas plantas controle (-Si) (Figura 9a). Este efeito deve-se ao fato da deficiência de K ter promovido a diminuição do teor de clorofila (Figura 7a) e aumentado o extravasamento de eletrólitos (Figura 8), fato também relatado por outros autores em plantas sorgo (CHEN et al. 2016ab).

As plantas deficientes de K que receberam Si tiveram incremento da taxa de fotossíntese em relação ao controle (-Si), destacando-se a aplicação do elemento na

solução nutritiva (Figura 9a), que também foi constatado por Chen et al. (2016b) em plantas de sorgo. Este efeito deve-se ao fato que o Si via radicular incrementou o acúmulo de K (Figura 6a), o teor de clorofila (Figura 7a) e o teor de carotenoides (Figura 7b).

A deficiência de K sem adição de Si aumentou a taxa da transpiração foliar (Figura 9b) e diminuiu o conteúdo de água da planta controle (Si) (Figura 9c), pois esse nutriente tem função de regulação osmótica na planta (PRADO, 2008; CHEN et al., 2016b).

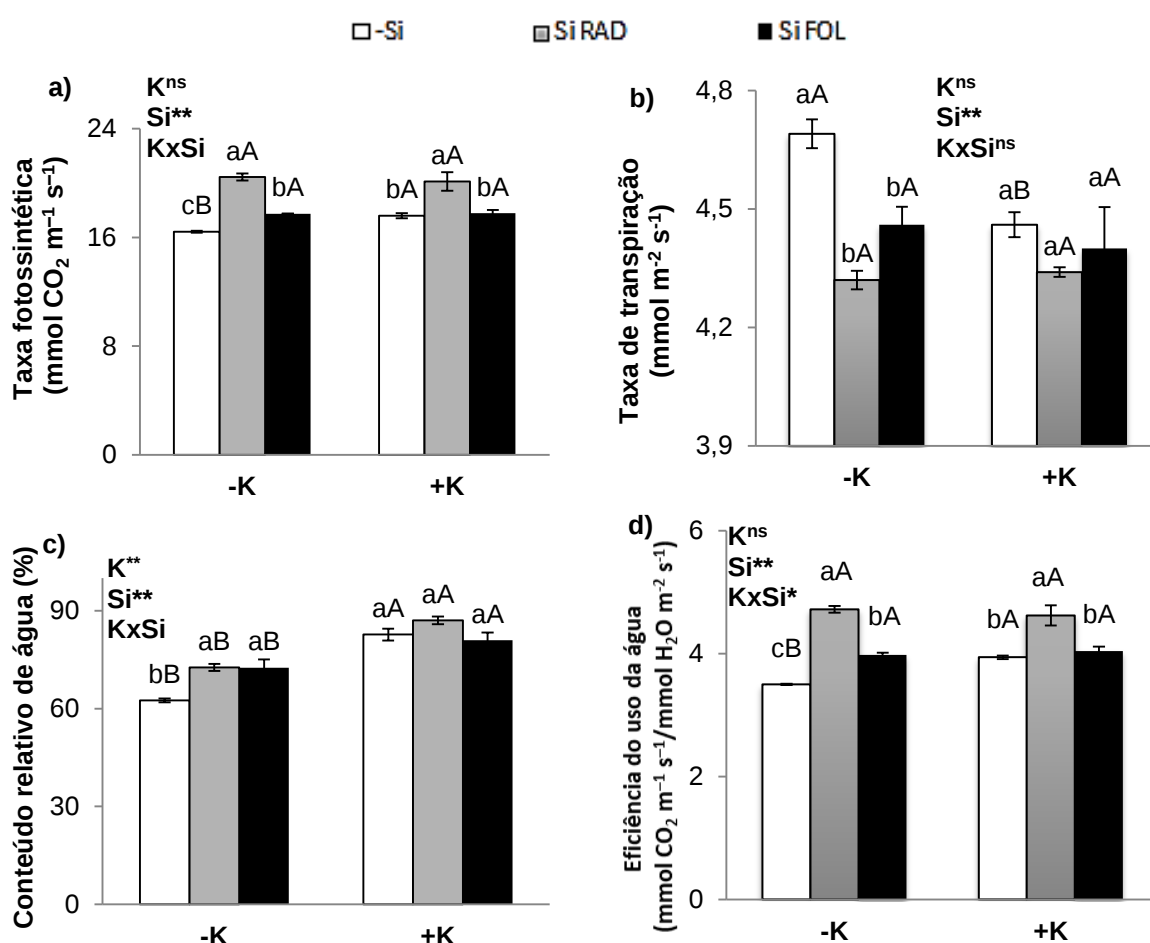


Figura 9. Taxa fotossintética (a), taxa de transpiração (b), conteúdo relativo de água (c) e eficiência do uso da água (d) de plantas de feijão cultivadas sob deficiência (-K) e suficiência (+K) de potássio, e com fornecimento de silício via radicular (Si RAD), via foliar (Si FOL) e controle (-Si). As barras de erro nas figuras representam erro padrão. Letras diferentes, minúsculas entre o modo de fornecimento de Si na mesma disponibilidade de K e as letras maiúsculas entre a concentração de K no mesmo modo de fornecimento de Si, indicam diferenças ($p < 0,05$, pelo teste de Tukey) entre os tratamentos.

Apenas nas plantas deficientes em K ficou evidente que o fornecimento de Si via solução nutritiva ou via foliar em relação ao controle (-Si) diminuiu a transpiração foliar (Figura 9b) e consequentemente aumentou conteúdo relativo de água da folha (Figura 9c). O efeito benéfico do Si no aumento do conteúdo de água da planta foi relatado por Chen et al. (2016b) em plantas de sorgo deficiente em K. Este efeito do Si deve-se ao fato da formação de uma camada de gel de sílica, que liga à celulose nas paredes das células epidérmicas, minimizando a perda de água (MA, 2004), e também devido o elemento estimular a atividade das aquaporinas, proteína que está associada com aperfeiçoamento do transporte hídrico na planta (CHEN et al., 2016b).

Observou-se, ainda, que a deficiência de K nas plantas controle (-Si) induziu diminuição da eficiência do uso da água (Figura 9d). Isso foi constatado porque a deficiência do macronutriente diminuiu a fotossíntese (Figura 9a) e aumentou a taxa de transpiração foliar (Figura 9b) resultando em baixa eficiência do uso da água.

No entanto, o Si nas duas formas de aplicação aumentou a eficiência do uso da água nas plantas deficientes em K, mas destacou-se o fornecimento do Si via solução nutritiva (Figura 9d). Esse efeito benéfico do Si no aumento da eficiência do uso da água deve-se ao aumento da fotossíntese (Figura 9a) e a diminuição da taxa de transpiração (Figura 9b).

Foi verificado que a deficiência de K diminuiu a área foliar (Figura 10a) (Apêndice 1), o comprimento da raiz (Figura 10b), a densidade de raiz (Figura 10c) e a área de raiz (Figura 10d) (Apêndice 2) no feijoeiro.

Entretanto, as plantas deficientes em K alimentadas com Si nas duas formas de aplicação do elemento comparado às plantas controle (-Si) apresentaram incremento na área foliar (Figura 10a) (Apêndice 1), no comprimento da raiz (Figura 10b), na densidade de raiz (Figura 10c) e na área de raiz (Figura 10d) (Apêndice 2), destacando-se a aplicação via radicular em relação a foliar. Já nas plantas sob suficiência de K, o fornecimento de Si via solução nutritiva ou foliar apenas incrementou a densidade da raiz (Figura 10c) (Apêndice 2).

Observou-se que a deficiência de K nas plantas controle (-Si) e nas que receberam Si nas duas formas de aplicação provocou decréscimo no crescimento da planta (Figura 10a, b, c, d). Este fato é amplamente relatado na literatura dada as funções do K na planta (BARKER; PILBEAM, 2015), devido a deficiência do macronutriente causar prejuízos nas variáveis biológicas como visto anteriormente.

Notou-se que nas plantas deficientes em K, as duas formas de aplicação de Si, com destaque para a aplicação via radicular em relação às plantas controle (-Si), incrementaram as variáveis de crescimento da planta (Figura 10a, b, c, d).

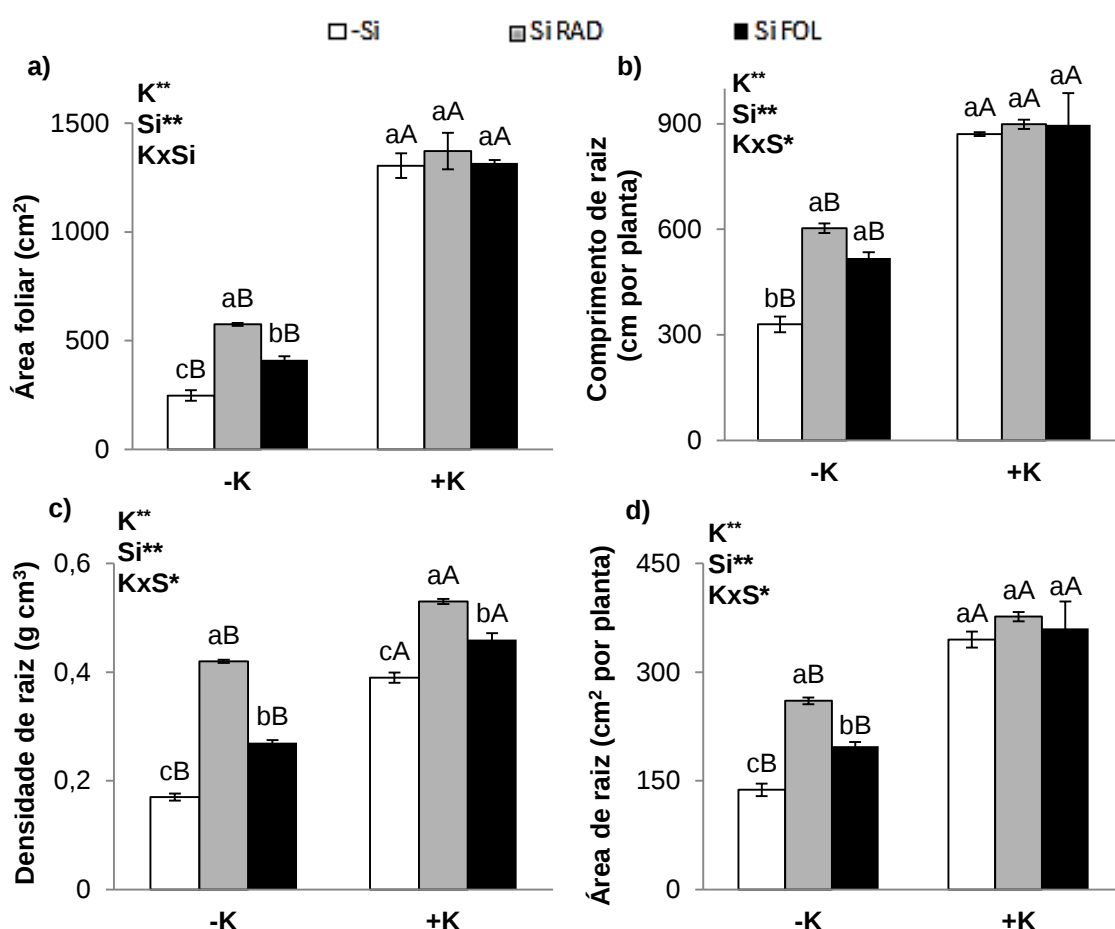


Figura 10. Área foliar (a), comprimento de raiz (b), densidade de raiz (c), área de raiz (d) de plantas de feijão cultivadas sob deficiência (-K) e suficiência (+K) de potássio, e com fornecimento de silício via radicular (Si RAD), via foliar (Si FOL) e controle (-Si). As barras de erro nas figuras representam erro padrão. Letras diferentes, minúsculas entre o modo de fornecimento de Si na mesma disponibilidade de K e as letras maiúsculas entre a concentração de K no mesmo modo de fornecimento de Si, indicam diferenças ($p < 0,05$, pelo teste de Tukey) entre os tratamentos.

É pertinente salientar que o fornecimento de Si via foliar melhorou as variáveis de crescimento da planta deficiente em K em relação ao controle (-Si) (Figuras 10a, b, c, d). Isso possivelmente deve-se ao efeito do Si foliar em relação ao controle (-Si) no aumento do teor de clorofila e carotenoides (Figura 7), da fotossíntese (Figura 9a) e da eficiência do uso da água (Figura 9d). O benefício do Si via foliar no alívio da deficiência de K é inédito na literatura, pois os estudos existentes forneceram o elemento apenas na solução nutritiva.

Por fim, nas plantas sob suficiência de K o fornecimento de Si via solução nutritiva ou foliar afetou pouco o crescimento da planta, pois houve apenas incremento da densidade da raiz (Figura 10c).

O benefício do Si no alívio da deficiência de K pode ser explicado devido as diferentes melhorias nutricionais e fisiológicas, iniciando com aumento da absorção de K (Figura 6a) e outra via associado a ação antioxidante da planta verificado pelo incremento do teor de clorofila (Figura 7a) e do composto antioxidante carotenoide (Figura 7b) aferido pela diminuição do extravasamento de eletrólitos (Figura 8), favorecendo a taxa de fotossíntese (Figura 9a). O outro efeito do Si seria na manutenção da água na planta dado a diminuição da taxa de transpiração (Figura 9b) que favoreceu aumento do conteúdo de água da planta (Figura 9c) e, portanto da eficiência de uso da água (Figura 9d).

Para a produção de biomassa, verificou-se que a deficiência de K diminuiu a massa seca da parte aérea (Figura 11a), a massa seca de raiz (Figura 11b) e a massa seca total (Figura 11c) no feijoeiro.

Por outro lado, as plantas cultivadas em solução nutritiva deficiente em K que foram tratadas com Si nas duas formas de aplicação do elemento comparado às plantas controle (-Si) apresentaram incremento na massa seca da parte aérea (Figura 11a), na massa seca de raiz (Figura 11b), e na massa seca total (Figura 11c), especialmente via aplicação radicular em comparado a foliar. Já nas plantas suficientes em K o fornecimento de Si via solução nutritiva ou foliar apenas incrementou a matéria seca da raiz (Figura 11b) e a massa seca total (Figura 11c).

Resultado semelhante do fornecimento de Si via solução nutritiva no incremento da massa seca em plantas deficientes em K foi obtido em soja (MIAO; HAN; ZHANG, 2010).

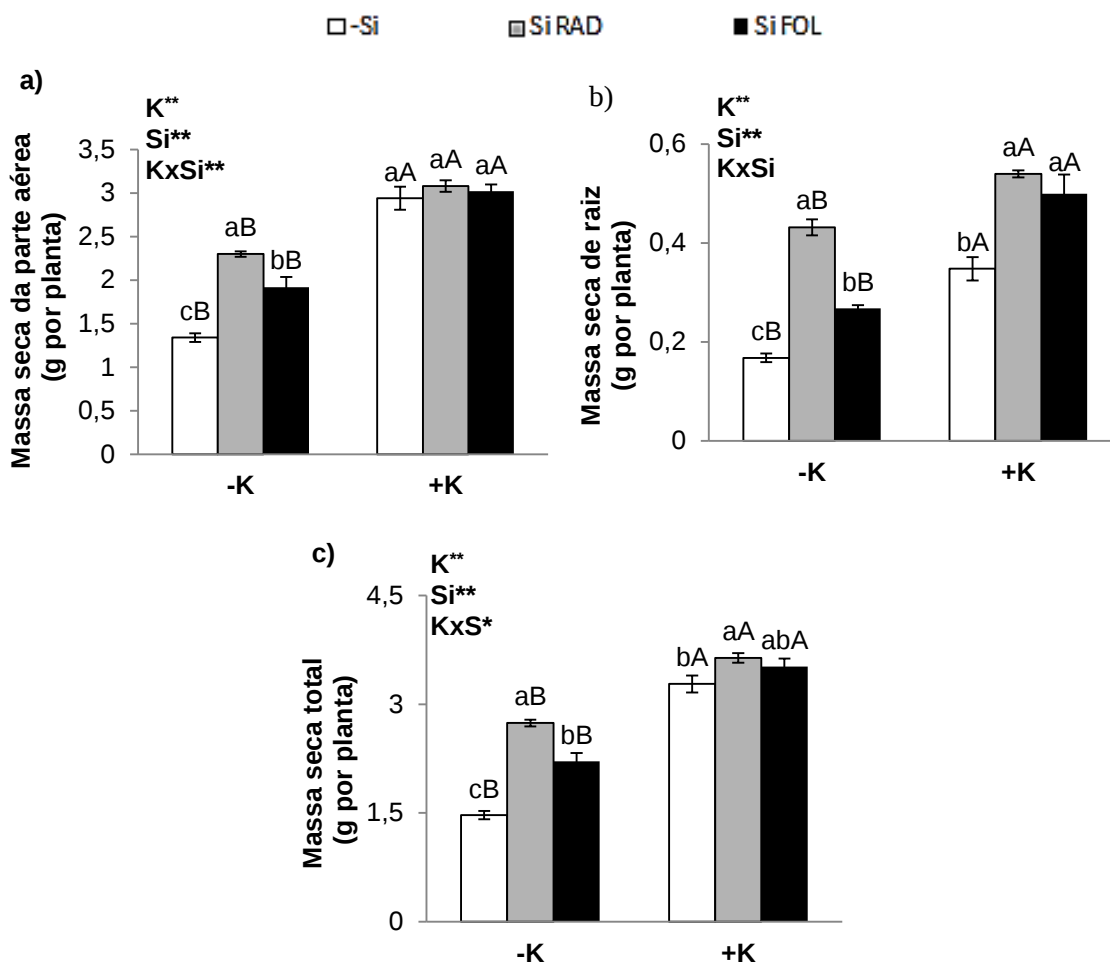


Figura 11. Massa seca da parte aérea (a), massa seca de raiz (b) e massa seca total (parte aérea + raiz) (c) de plantas de feijão cultivadas sob deficiência (-K) e suficiência (+K) de potássio, e com fornecimento de silício via radicular (Si RAD), via foliar (Si FOL) e controle (-Si). As barras de erro nas figuras representam erro padrão. Letras diferentes, minúsculas entre o modo de fornecimento de Si na mesma disponibilidade de K e as letras maiúsculas entre a concentração de K no mesmo modo de fornecimento de Si, indicam diferenças ($p < 0,05$, pelo teste de Tukey) entre os tratamentos.

Portanto, essa melhoria da nutrição e da fisiologia da planta com o fornecimento de Si na planta deficiente em K reverteu em aumento da eficiência de uso do macronutriente em converter em biomassa (Figura 6b) e, portanto no

crescimento da planta. Estes efeitos benéficos do Si fornecido via solução nutritiva na fisiologia das plantas e no crescimento da planta deficiente em K foi também constatado por Chen et al. (2016ab) e Miao, Han e Zhang (2010).

A presente pesquisa permitiu aceitar a hipótese formulada que indica o efeito mitigador do Si na deficiência de K com destaque para o fornecimento via solução nutritiva, mas a via foliar também pode ser usada como uma alternativa viável em para o aplicação do elemento plantas de feijão.

5. CONCLUSÕES

A pulverização foliar com Si foi viável agronomicamente para o feijoeiro, destacando-se o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol na concentração de 5,36 mmol L⁻¹.

O Si mitigou estresses por deficiência de K no feijoeiro devido a melhoria das variáveis nutricionais, fisiológicas e de crescimento, destacando-se o fornecimento de Si via solução nutritiva em relação avia foliar, embora essa última forma de aplicação do elemento benéfico também tenha atenuado a deficiência do macronutriente.

6. REFERÊNCIAS

ABBAS, T.; BALAL, R. M.; SHAHID, M. A.; PERVEZ, M. A.; AYYUB, C. M.; AQUEEL, M. A.; JAVAID, M. M. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. **Acta physiologiae plantarum**, Warszawa, v. 37, n. 2, p. 6, 2015.

AWASTHI, R.; BHANDARI, K.; NAYYAR, H. Temperature stress and redox homeostasis in agricultural crops. **Frontiers in Environmental Sciences**, Lausanne, v. 3, p. 1-24, 2015.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação agronômica & Agroestat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos. Jaboticabal: Multipress, 2016. 396p.

BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. **Handbook of plant nutrition**. CRC press, 2015.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico. 1983, p.48. (Boletim Técnico, v.78).

BIRCHALL, J. D. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, London, v. 24, n. 5, p. 351-357, 1995.

CARNEIRO, J. M. T.; OLIVEIRA, L. A.; ROSSETTE, A. L. R. M.; ABREU JR, C. H.; BENDASSOLLI, J. A. Accumulation and translocation of silicon in rice and bean plants using the ³⁰Si stable isotope. **Journal of plant nutrition**, Nova York, v. 33, n. 9, p. 1374-1383, 2010.

CASTRO, P. R. C. **Princípios da adubação foliar**. Jaboticabal: FUNEP, 2009. 42 p.

CHEN, D.; CAO, B.; QI, L.; YIN, L.; WANG, S.; DENG, X. Silicon-moderated K-deficiency-induced leaf chlorosis by decreasing putrescine accumulation in sorghum. **Annals of Botany**, Oxford, v. 118, n. 2, p. 305-315, 2016a.

CHEN, D.; CAO, B.; WANG, S.; LIU, P.; DENG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific reports**, London, v. 6, n. 22882, 2016b.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M. D.; FERRARI NETO, J. Foliar application of stabilized silicic acid on soybean, common bean, and peanut. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n.2, p. 404-410, 2013.

DANTAS, J. P.; BERGAMIN FILHO, H.; MALAVOLTA, E. Estudos sobre a nutrição mineral do feijão macassar (*Vigna sinensis* (L.) ENDL.). III: efeitos das carências de micronutrientes no crescimento, produção e composição mineral das folhas. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 36, p. 259-268, 1979.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. Silicon in Agriculture. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 p.

DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on everglades histosols. **Journal of Plant Nutrition**, Nova York, v. 16, n. 11, p. 2273 - 2280, 1993.

DING, Y. F. **Mechanisms of silicon-enhancement of drought tolerance in wheat seedlings**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Nanjing Agricultural University, Nanquim, 2006.

DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, Shannon, v. 135, n. 1, p.1-9, 1998.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual review of plant biology**, Palo Alto, v. 50, p. 641-664, 1999.

FIGUEIREDO, F. C.; BOTREL, P. P.; TEIXEIRA, C. P.; PETRAZZINI, L. L.; LOCARNO, M.; CARVALHO, J. G. Pulverização foliar e fertirrigação com silício nos atributos físico-químicos de qualidade e índices de coloração do morango. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 5, p. 1306-1311, 2010.

FREITAS, L. B.; COELHO, E. M.; MAIA, S. C. M.; SILVA, T. R. B. Adubação foliar com silício na cultura do milho. **Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 2, 2015.

GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, Nova York, v. 29, n. 9, p.1637-1647, 2006.

GONZÁLEZ, L.; GONZÁLEZ-VILAR, M. Determination of relative water content, in Reigosa, M. J. (ed.): **Handbook of plant ecophysiology techniques**. Dordrecht: Kluwer Academic, p. 207–212, 2001.

HARRIS, G. A.; CAMPBELL, G. S. Automated quantification of roots using a simple image analyzer. **Agronomy journal**, Madison, v. 81, n. 6, p. 935-938, 1989.

HAVAUX, M. Carotenoids as membrane stabilizers in chloroplasts. **Trends in plant Science**, Kidlington, v. 3, n. 4, p. 147–151, 1998.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water-culture method for growing plants without soil**. California: California Agricultural experiment Station, 1950. 32p. (Circular v. 247).

HOSSEINI, S. A.; MAILLARD, A.; HAJIREZAEI, M. R.; ALI, N.; SCHWARZENBERG, A.; JAMOIS, F.; YVIN, J. C. Induction of Barley Silicon Transporter HvLsi1 and HvLsi2, increased silicon concentration in the shoot and regulated Starch and ABA Homeostasis under Osmotic stress and Concomitant Potassium Deficiency. **Frontiers in plant science**, Lausanne, v. 8, p. 1359, 2017.

JAFAREI, Y.; TABRIZI, E. F. M.; BYBORDI, A. Effect of different stages and times of silicon foliar spray on yield and yield components of bean. **Cumhuriyet Science Journal**, Sivas, v. 36, n. 4, p. 81-92, 2015.

JOHNSON, M.; HAVAUX, M.; TRIANTAPHYLIDES, C.; KSAS, B.; PASCAL, A. A.; ROBERT, B.; DAVISON, P. A.; RUBAN, A. V.; HORTON, P. Elevated zeaxanthin bound to oligomeric LHCII enhances the resistance of Arabidopsis to photooxidative stress by a lipid-protective, antioxidant mechanism. **The Journal of biological chemistry**, Baltimore, v. 282, n. 31, p. 22605–22618, 2007.

JONES JR, J. B. **Plant nutrition and soil fertility manual**. CRC press, 2012.

KANAI, S.; MOGHAIEB, R. E.; EL-SHEMY, H. A.; PANIGRAHI, R.; MOHAPATRA, P. K.; ITO, J.; NGUYEN, N. T.; SANEOKA, H.; FUJITA, K. Potassium deficiency affects water status and photosynthetic rate of the vegetative sink in green house tomato prior to its effects on source activity. **Plant science**, Shannon, v. 180, n. 2, p. 368-374, 2011.

KRUSE, E.; UEHLEIN, N.; KALDENHOFF, R. The aquaporins. **Genome Biology**, London, v. 7, n. 2, p. 206, 2006.

LIANG, Y. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. **Plant and soil**, Perth, v. 209, n. 2, p. 217, 1999.

LICHTENTHALER, H. K.; WELLBURN, A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions**, London, v. 603, p. 591–592, 1983.

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Papel do silício na produção de cana de açúcar. In: SECAP 200, SEMINÁRIO DE CANA DE AÇÚCAR DE PIRACICABA, 5, Piracicaba, 2000.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLA, A. **Análise de silício**: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: UFU, 2004. 34p. (Boletim Técnico v.2.).

KUBICKI, J. D.; HEANEY, P. J. Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 67, n. 21, p. 4113–4121, 2003.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: **Studies in plant Science**, Elsevier, v. 8, p. 17-39, 2001

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

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

MALI, M.; AERY, N. C. Effect of silicon on growth, biochemical constituents, and mineral nutrition of cowpea. **Communications in soil science and plant analysis**, New York, v. 40, n. 7-8, p. 1041-1052, 2009.

MALI, M.; AERY, N. C. Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 31, n. 11, p. 1867-1876, 2008.

MIAO, B. H.; HAN, X. G.; ZHANG, W. H. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany**, Oxford, v. 105, n. 6, p. 967-973, 2010.

PEOPLES, T. R.; KOCH, D. W. Role of potassium in carbon dioxide assimilation in *Medicago sativa* L. **Plant physiology**, Belmont, v. 63, n. 5, p. 878-881, 1979.

PIPERNO, D. L. **Phytolith Analysis**. Academic Press, San Diego, 1988.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. Editora Unesp, 2008.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 9, p. 1199-1204, 2001.

PULZ, A. L.; CRUSCIOL, C. A. C.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n.4, p. 1651-1659, 2008.

RAVEN, J. A. Silicon transport at the cell and tissue level. In: **Studies in plant science**. Elsevier, 2001. p. 41-55.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of plant nutrition**, Nova York, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981.

SIVANESAN, I.; SON, M. S.; SOUNDARARAJAN, P.; JEONG, B. R. Effect of silicon on growth and temperature stress tolerance of *Nephrolepis exaltata* 'Corditas'. **Korean Journal of Horticultural Science and Technology**, Iseo-myeon, v. 32, n. 2, p. 142-148, 2014.

SOUSA, J. V.; RODRIGUES, C. R.; LUZ, J. M. Q.; SOUSA, V. B. F.; DE CARVALHO, P. C.; RODRIGUES, T. M.; DE BRITO, C. H. Silicato de potássio via foliar no milho: fotossíntese, crescimento e produtividade. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 4, 2010.

TESTER, M.; BLATT, M. R. Direct measurement of K⁺ channels in thylakoid membranes by incorporation of vesicles into planar lipid bilayers. **Plant Physiology**, Belmont, v. 91, n. 1, p. 249-252, 1989.

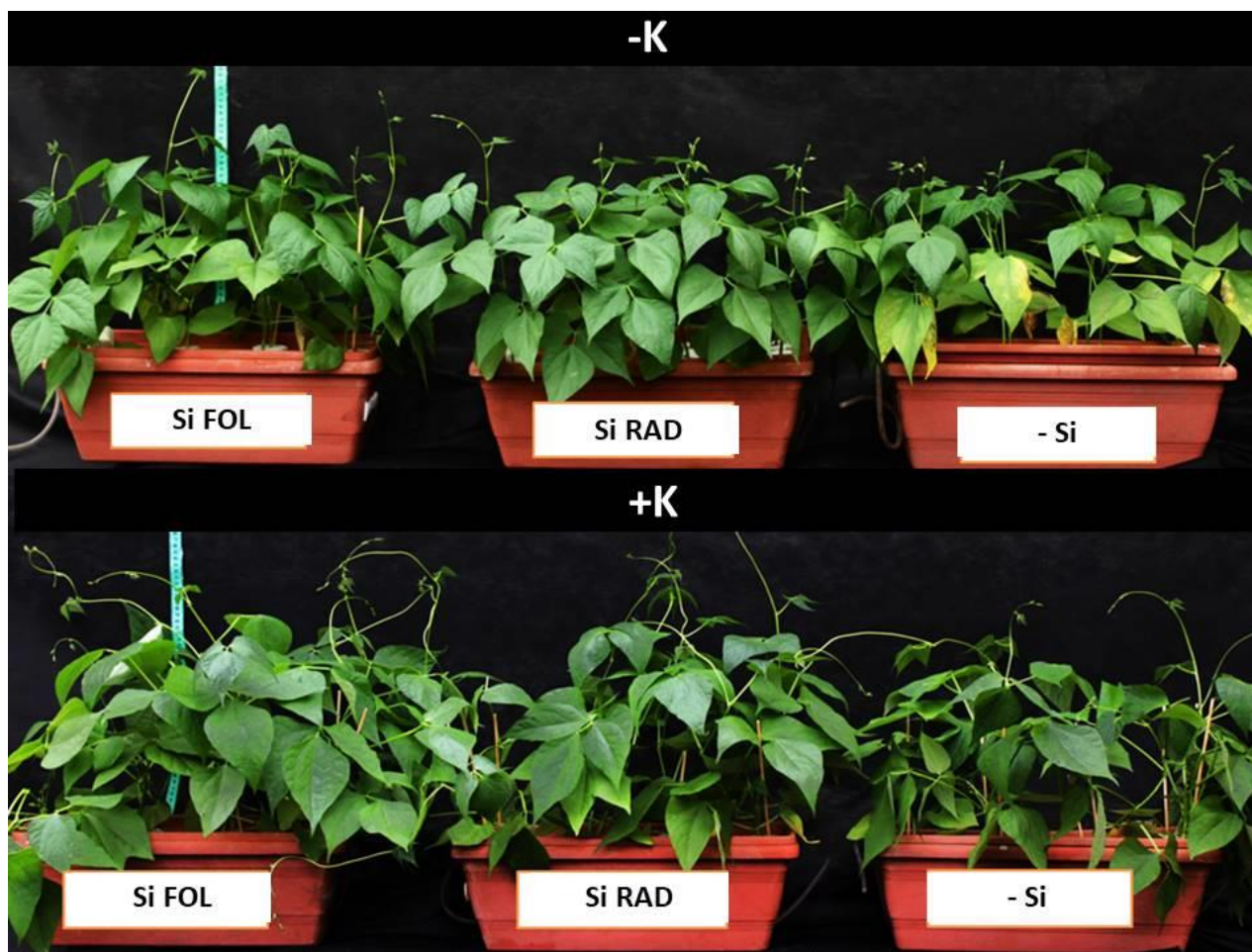
VIEIRA, C. **O feijoeiro-comum: cultura, doenças e melhoramento**. Viçosa: UFV, 1967. 220p.

WIESE, H.; NIKOLIC, M.; RÖMHELD, V. Silicon in plant nutrition. In: **The apoplast of higher plants: Compartment of storage, transport and reactions**. Springer, Dordrecht, 2007. p. 33-47.

ZANÃO JR, L. A; FONTES, R. L. F.; ÁVILA, V. T. Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 44, n. 2, p. 203-206, 2010.

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

APÊNDICE



Apêndice 1. Parte aérea de plantas de feijão cultivadas sob deficiência (-K) e suficiência (+K) de potássio, e com fornecimento de silício via radicular (Si RAD), via foliar (Si FOL) e controle (-Si).



Apêndice 2. Parte aérea e sistema radicular de plantas de feijão cultivadas sob deficiência (-K) e suficiência (+K) de potássio, com fornecimento de silício via radicular (Si RAD), via foliar (Si FOL) e controle (-Si).