



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

LARISSA LANAY GERMANO DE QUEIROZ

**SILÍCIO COMO ATENUANTE DO DÉFICIT HÍDRICO EM GENÓTIPOS DE
FEIJÃO-CAUPI [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] EM CONDIÇÃO SEMIÁRIDA**

CAMPINA GRANDE – PB

2023

LARISSA LANAY GERMANO DE QUEIROZ

**SILÍCIO COMO ATENUANTE DO DÉFICIT HÍDRICO EM GENÓTIPOS DE
FEIJÃO-CAUPI [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] EM CONDIÇÃO SEMIÁRIDA**

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: Agricultura Familiar e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Franklin de Mesquita

Coorientador: Prof. Dr. Alberto Soares de Melo

CAMPINA GRANDE – PB

2023

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.

Q3s Queiroz, Larissa Lanay Germano de.
Silício como atenuante do déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] em condição semiárida [manuscrito] / Larissa Lanay Germano de Queiroz. - 2023.
102 p. : il. colorido.

Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, 2023.
"Orientação : Prof. Dr. Evandro Franklin de Mesquita , Departamento de Agrárias e Exatas - CCHA. "
"Coorientação: Prof. Dr. Alberto Soares de Melo , Departamento de Biologia - CCBS."
1. Eficiência hídrica. 2. Estresse abiótico. 3. Silício na agricultura. I. Título

21. ed. CDD 630

LARISSA LANAY GERMANO DE QUEIROZ

**SILÍCIO COMO ATENUANTE DO DÉFICIT HÍDRICO EM GENÓTIPOS DE
FEIJÃO-CAUPI [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] EM CONDIÇÃO SEMIÁRIDA**

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: Agricultura Familiar e Sustentabilidade.

Aprovado em 26/04/2023.

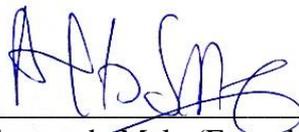
Banca examinadora



Prof. Dr. Rejane Maria Nunes Mendonça (Fitotecnia - Produção Vegetal) – UFPB
(Examinador)



Prof. Dr. José Félix de Brito Neto (Agronomia - Produção Vegetal) – UEPB
(Examinador)



Prof^o Dr. Alberto Soares de Melo (Engenharia Agrícola) – UEPB
(Coorientador)



Prof. Dr. Evandro Franklin de Mesquita (Engenharia Agrônômica) – UEPB
(Orientador)

Ao meu avô Moacir Quintino (*in memoriam*),
que tanto sonhou com esse momento e que sempre
conduziu e incentivou minha educação acadêmica.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo o meu respirar e entender, por tudo o que Ele tem proporcionado na minha vida e por se fazer tão presente nas minhas decisões e caminhos.

Agradeço também àquela que me cuida, me embala e me quer bem, Nossa Senhora, por todas as vezes que me vi perdida e que com sua doce e singela paciência intercedeu pela minha vida a Jesus Cristo.

Agradeço a minha mãe Júlia Firmina por todo apoio e amor, por sempre me dar forças para prosseguir, me ensinar que nunca devo baixar a cabeça para os meus sonhos, e que enfrentar as dificuldades nos faz mais fortes.

Agradeço a meu pai Carlos Luiz e a minha irmã Laura Lays por serem companheiros e fortalecedores dos dias difíceis.

Agradeço ao meu noivo e futuro esposo Renato Alfredo, pela paciência e compreensão, por ter sido, muitas vezes, meu lugar mais calmo e por sempre me fazer acreditar que eu sou capaz de conseguir tudo o que eu almejo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Evandro Franklin de Mesquita, pelas colaborações, por toda compreensão, por ter sido muitas vezes usado por Deus para me tranquilizar e pelos ensinamentos que irão colaborar de modo positivo na minha vida profissional e pessoal.

Agradeço ao bolsista do PIBIC, Caio, por ter feito o possível e muitas vezes, o impossível para a pesquisa ser realizada com sucesso, sua ajuda foi essencial.

Agradeço aos meus colegas de curso por sempre estarem presentes e ficarmos juntos na hora da adversidade, vocês foram indispensáveis: Jailma, Izamara, Gabrielly, Camila, Luana, Marcelo e Andreza.

Aos meus colegas e companheiros do ECOLAB: Rayane, Guilherme, Ingrid, Priscila e Deibson, por todo o apoio, paciência ilimitada comigo e esforço no trabalho.

Agradeço aos membros do SOLAPLANT, por colaborarem direto e indiretamente no trabalho desenvolvido.

Agradeço aos membros da banca examinadora por todas as contribuições na pesquisa.

Agradeço a Danilo, por colaborar em todos os momentos de dúvidas e por sempre estar disponível.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, na pessoa do Prof. Dr. Carlos Menezes, por contribuir em mais um ciclo da minha vida.

Agradeço aos professores do mestrado, em especial ao professor Félix, professor Alberto e professor Diogo, por todas as palavras, por toda ajuda e por todos os conselhos.

Agradeço a Universidade Estadual da Paraíba – UEPB por ter me concedido essa oportunidade de dar mais um passo relevante na minha carreira profissional como Mestre em Ciências Agrárias.

RESUMO

O feijão-caupi é da família *Fabaceae* (leguminosa) cultivado em todo território do Brasil, considerado como o terceiro maior produtor dessa cultura, destacando-se as regiões Norte e Nordeste como maiores produtoras. Porém, a deficiência hídrica é um dos principais fatores que reduzem o máximo potencial produtivo do feijão-caupi, como perda de turgor celular, diminuição da condutância estomática, reduzindo a transpiração, e, conseqüentemente, inibindo a fotossíntese. Para isso, uma das alternativas pode ser o uso do silício (Si) na agricultura, que exerce ação benéfica para o desenvolvimento das plantas, atenuando os déficits abióticos e bióticos, melhorando assim, o rendimento de genótipos de feijão-caupi. Com isso, o objetivo da pesquisa foi avaliar os efeitos da aplicação silicatada via foliar e das lâminas de irrigação na eficiência do uso da água sobre o comportamento agrônômico dos genótipos de feijão-caupi: BRS Pajeú, BRS Novaera e BRS Pujante, propondo atenuar os efeitos deletérios da restrição hídrica em condição semiárida. O experimento foi distribuído em arranjo de parcela subdividida [$2 \times (2 \times 2)$], em blocos casualizados, com quatro repetições e 30 plantas por unidade experimental. A parcela principal foi referente às lâminas de irrigação (50% e 100% ET_0) e as subparcelas pelos genótipos de feijão-caupi (BRS Novaera – G1, BRS Pujante – G2 e BRS Pajeú – G3) com e sem aplicação de ácido silícico (com 600 mg.L^{-1} de silício e sem (0 mg.L^{-1}). As pulverizações aconteceram nas fases fenológicas nos estádios V5 (terceira folha trifoliada encontra-se com os folíolos separados e completamente abertos), estágio V9 (terceira folha do ramo secundário encontra-se completamente aberta), e estágio R2 (antese da primeira flor, geralmente oriunda do primeiro botão floral). A fonte de silício utilizada foi o ácido silícico (Si(OH)_4). As variáveis analisadas foram crescimento, fitomassa, trocas gasosas, macronutrientes e sódio, atributos químicos do solo e componentes de produção, através da raiz, caule, folha, vagem verde, grãos por vagem verde, vagem seca e grãos secos. Os dados foram submetidos às análises de variância pelo teste F, as médias dos níveis de reposição da ET_0 , silício e genótipos de feijão-caupi foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro. Em geral, o silício proporcionou atenuação do déficit hídrico com aumento no crescimento, no rendimento de grãos e no desenvolvimento nos genótipos de feijão-caupi; além de otimizar o aporte de massa seca total; o BRS Pajeú expressou maior diâmetro caulinar, área foliar, massa seca da parte aérea e massa seca total, na lâmina de irrigação sem déficit hídrico com aplicação e sem aplicação de silício; BRS Novaera demonstrou o maior número de vagens secas por planta em todos os tipos de tratamentos avaliados (lâminas de irrigação e aplicação de silício),

apresentando assim a maior produtividade de grãos tanto com aplicação de silício como sem a aplicação; os genótipos de feijão-caupi BRS Novaera, BRS Pujante e BRS Pajeú são indicados para o cultivo em regiões semiáridas.

Palavras-chave: eficiência hídrica; estresse abiótico; silício na agricultura.

ABSTRACT

The cowpea is of the Fabaceae family (legume) cultivated throughout Brazil, considered as the third largest producer of this crop, highlighting the North and Northeast regions as the largest producers. However, water deficiency is one of the main factors that reduce the maximum productive potential of cowpea, such as loss of cellular turgor, decreased stomatal conductance, reduced transpiration, and, consequently, inhibiting photosynthesis. For this, one of the alternatives may be the use of silicon (Si) in agriculture, which exerts beneficial action for the development of plants, attenuating abiotic and biotic deficits, thus improving the yield of cowpea genotypes. Thus, the objective of the research was to evaluate the effects of foliar silicate application and irrigation depths on the efficiency of water use on the agronomic behavior of cowpea genotypes: BRS Pajeú, BRS Novaera and BRS Pujante, proposing to attenuate the deleterious effects of water restriction in semi-arid conditions. The experiment was distributed in a split-plot arrangement [$2 \times (2 \times 2)$], in randomized blocks, with four replications and 30 plants per experimental unit. The main plot was related to irrigation depths (50% and 100% ET₀) and subplots by cowpea genotypes (BRS Novaera – G1, BRS Pujante – G2 and BRS Pajeú – G3) with and without application of silicic acid (with 600 mg. L⁻¹ silicon and without (0 mg. L⁻¹). The sprays occurred in the phenological phases in stages V5 (third trifoliate leaf is with the leaflets separated and completely open), stage V9 (third leaf of the secondary branch is completely open), and stage R2 (anthesis of the first flower, usually from the first flower bud). The silicon source used was silicic acid (Si(OH)₄). The variables analyzed were growth, phytomass, gas exchange, macronutrientes and sodium, soil chemical attributes and production components, through the root, stem, leaf, green pod, grains by green pod, dry pod and dry grains. The data were submitted to analysis of variance by the F test, the means of the replacement levels of ET₀, silicon and cowpea genotypes were compared by Tukey's test, at 5% probability of error. In general, silicon provided attenuation of water deficit with increased growth, grain yield and development in cowpea genotypes; in addition to optimizing the total dry mass intake; the BRS Pajeú expressed larger stem diameter, leaf area, shoot dry mass and total dry mass, in the irrigation depth without water deficit with application and without silicon application; BRS Novaera demonstrated the highest number of dry pods per plant in all types of treatments evaluated (irrigation depths and silicon application), thus presenting the highest grain yield both with silicon application and without the application; the cowpea genotypes BRS Novaera, BRS Pujante and BRS Pajeú are indicated for cultivation in semi-arid regions.

Keywords: water efficiency; abiotic stress; silicon in agriculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área experimental. Catolé do Rocha, PB, 2021.	32
Figura 2. Coleta do solo do experimento para análise (A/B). Secagem das amostras de solo em estufa (C). Catolé do Rocha, PB, 2021.....	33
Figura 3. Coleta de solo da área experimental (A). Avaliação das amostras de solo coletado no experimento das cultivares de feijão-caupi (Figura B/C). Lagoa Seca, PB, 2022.....	34
Figura 4. Genótipos de feijão-caupi utilizados no experimento, BRS Novaera (A), BRS Pujante (B), BRS Pajeú (C). Catolé do Rocha, PB, 2021.	35
Figura 5. Croqui do experimento em campo com genótipos do feijão-caupi. Legenda: L1= Reposição de evapotranspiração de referência (ET ₀): 100%; L2= Reposição de evapotranspiração de referência (ET ₀): 50%; G1= BRS Novaera; G2= BRS Pujante; G3= BRS Pajeú; S1= Com silício aplicado via foliar; S2= Sem silício aplicado via foliar.	36
Figura 6. Método de evapotranspiração de irrigação, por meio de fitas gotejadoras (A/B). Catolé do Rocha, PB, 2021.	37
Figura 7. Aplicação dos tratamentos com ácido silícico, utilizando pulverizador costal (A/B). Catolé do Rocha, PB, 2021.	38
Figura 8. Análise da temperatura superficial (A) e de profundidade (B) do experimento das cultivares de feijão-caupi. Catolé do Rocha, PB, 2021.....	39
Figura 9. Determinação da temperatura do ar entre os blocos casualizados. Catolé do Rocha, PB, 2021.....	40
Figura 10. Análise de crescimento e fitomassa, através do comprimento, diâmetro, altura e massa seca (A/B) em cultivares de feijão-caupi. Catolé do Rocha, PB, 2021.	41
Figura 11. Determinação da fitomassa, através de secagem (A) e pesagem (B) das cultivares de feijão-caupi. Catolé do Rocha, PB, 2021.....	42
Figura 12. Análise dos fatores de produção, através do comprimento das vagens (A), números (B) e peso de grãos (C) das cultivares de feijão-caupi. Catolé do Rocha, PB, 2021.	44
Figura 13. Potencial hidrogeniônico na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L ⁻¹) e sem (0 mg.L ⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.	48
Figura 14. Condutividade elétrica na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L ⁻¹) e sem (0 mg.L ⁻¹)	

silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) (A) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F (B). 49

Figura 15. Fósforo na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesmas letras gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 50

Figura 16. Potássio na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 52

Figura 17. Sódio na solução do solo nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 53

Figura 18. Cálcio na solução do solo nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F (A). Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F (B). 54

Figura 19. Magnésio na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) (A) não diferem entre si a 5% de

probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) (B) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 56

Figura 20. Capacidade de troca de cátions na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 57

Figura 21. Matéria orgânica na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 58

Figura 22. Concentração de fósforo em folhas nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022..... 60

Figura 23. Concentrações de potássio em folhas nas cultivares de feijão-caupi submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma não diferem entre si pelo teste F. 61

Figura 24. Concentração de sódio em folhas nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022..... 63

Figura 25. Concentração de Cálcio em folhas nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022..... 64

Figura 26. Comprimento do ramo principal nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e lâminas de irrigação (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F..... 67

Figura 27. Diâmetro caulinar nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L ⁻¹) e sem (0 mg.L ⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.....	68
Figura 28. Área foliar nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), com (600 mg.L ⁻¹) e sem (0 mg.L ⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F(A). Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F (B).....	70
Figura 29. Eficiência do uso da água nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L ⁻¹) e sem (0 mg.L ⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.....	71
Figura 30. Taxa de crescimento absoluto (TCA) nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L ⁻¹) e sem (0 mg.L ⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.....	72
Figura 31. Taxa de crescimento relativo do diâmetro (TCR) de genótipos de feijão em função de duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.	73
Figura 32. Massa seca radicular nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L ⁻¹) e sem (0 mg.L ⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.....	74
Figura 33. Massa seca da parte aérea nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e	

com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 75

Figura 34. Massa seca total nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 77

Figura 35. Comprimento da vagem verde nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 79

Figura 36. Diâmetro da vagem verde nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (P >0,05) e pelo teste F (P >0,05). 80

Figura 37. Número de grãos por vagem verde nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. 81

Figura 38. Peso da vagem verde nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) (A) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) (B) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 82

Figura 39. Peso de grãos por vagem verde nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022.

Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) (A) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) (B) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F..... 83

Figura 40. Número de vagens secas por planta nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022.

Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. 84

Figura 41. Produtividade de grãos secos nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022.

Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) (A) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F (B)..... 86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fases e subfases do ciclo vegetativo e reprodutivo do feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp) segundo a classificação de Moura et al. (2012).	26
Tabela 2. Caracterização química, quanto à fertilidade, e física do solo da área experimental.	34
Tabela 3. Caracterização química da água utilizada no experimento.	36
Tabela 4. Valores da irrigação (mm fase ⁻¹) durante a condução do experimento.	37
Tabela 5. Composição química do silício.	39
Tabela 6. Valores médios da temperatura superficial do solo.	39
Tabela 7. Dados médios mensais da temperatura e umidade relativa do ar, evaporação de referência e pluviosidade, Catolé do Rocha-PB, 2021.....	40
Tabela 8. Resumo da análise de variância para as variáveis Potencial hidrogeniônico na solução do solo (pH), Condutividade elétrica na solução do solo (CE), Fósforo na solução do solo (P), Potássio na solução do solo (K ⁺), Sódio na solução do solo (Na ⁺), Cálcio na solução do solo (Ca ²⁺), Magnésio na solução do solo (Mg ²⁺), Capacidade de troca de cátions(CTC) e Matéria orgânica (MO) nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera, BRS Pujante e BRS Pajeú, submetidos a duas lâminas de irrigação e com e sem silício.	46
Tabela 9. Resumo da análise de variância para as variáveis Sódio (Na), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Fósforo (P) nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera, BRS Pujante e BRS Pajeú, submetidos a duas lâminas de irrigação e com e sem silício.....	59
Tabela 10. Resumo da análise de variância para as variáveis altura de planta (AP), diâmetro caulinar (DC), área foliar (AF),eficiência do uso de água pelas plantas (EUA), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), massa seca de raiz (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST) nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera, BRS Pujante e BRS Pajeú, submetidos a duas lâminas de irrigação e com e sem silício.	66
Tabela 11. Resumo da análise de variância para as variáveis Comprimento da vagem verde (CVV), Diâmetro da vagem verde (DVV), Número de Grãos por vagem verde (NGVV), Peso da vagem verde (PVV), Peso de grãos por vagem verde (PGVV), Número de vagens secas por planta (NVPS) e Produtividade de grãos secos (PROD) nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera, BRS Pujante e BRS Pajeú, submetidos a duas lâminas de irrigação e com e sem silício.	78

LISTA DE ABREVIATURAS

Ada = Argila dispersa em água
Adi = Água disponível no solo
AF = Área foliar
AFD = Área foliar dos discos
AFO = Área foliar total
Al = Alumínio
Al³⁺ = Alumínio trocável
AP = Altura de planta
Ca = Cálcio
Ca²⁺ = Cálcio trocável
Ceai = Condutividade elétrica da água de irrigação
CO₂ = Gás carbônico
cm = Centímetros
cmolc = Centimol
CRA = Conteúdo relativo de água
CRP = Comprimento do ramo principal
CTC = Capacidade de troca catiônica
CV = Comprimento de vagens
°C = Graus Celsius
DAS = Dias após a semeadura
DAE = Dias após emergência
DAP = Dias após a semeadura
DC = Diâmetro caulinar
dm = Decímetro
Df = Grau de floculação
Dp = Densidade de partículas
Ds = Densidade do solo
EUA = Eficiência no uso da água
E0 = Sem déficit hídrico (100% de disponibilidade de água)
E1 = Com restrição hídrica (50% de disponibilidade de água)
ET₀ = Evapotranspiração de referência
ETc = Evapotranspiração de cultura

FAA = Franco argilo arenosa.
Fe = Ferro
g = Grama
GE = Genótipo
GRFA = Ganho relativo de fitomassa da parte aérea
H⁺⁺ = Hidrogênio trocável
ha = Hectare
H₂O = Água
K = Potássio
K_c = Coeficiente de cultura
K_g = Quilos
L = Litro
LLD = Lâmina de irrigação líquida diária
LM = Lâmina
ln = Logarítmo neperiano
m = Metro
MCG = Massa de cem grãos
MFD = Massa fresca do disco foliar
MFT = Massa fresca total
mg = Miligrama
Mg = Magnésio
Mg²⁺ = Magnésio trocável
MGP = Massa de grãos por planta
min = Minutos
mL = Mililitros
mM = Milimolar
Mn = Manganês
MOS = Matéria orgânica do solo
ms = Massa do solo seco
MSD = Massa seca dos discos
MSF = massa seca das folhas
MSPA = Massa seca da parte aérea
MSR = Massa seca radicular
MST = Massa seca total da parte aérea

MTD = Massa túrgida do disco foliar
MVC = Massa de vagens com sementes
MVS = Massa de vagens sem sementes
Na = Sódio
Na⁺ = Sódio trocável
NDF = Número médio de dias para a floração
NGV = Número de grãos por vagem
NVP = Número de vagens por planta
O₂ = Gás oxigênio
OH• = Radical hidroxila
RAS = Razão de adsorção de sódio
SB = Soma de bases trocáveis
Si = Silício
SiO₂ = Dióxido de silício
Si(OH)₄ = Ácido silícico
TCA = Taxa de crescimento relativo
TCR = Taxa de crescimento relativo
TCRA = Taxa de crescimento relativo da parte aérea
TEA = Taxa de expansão absoluta
U = Umidade
UC = Uso consutivo das plantas
U_{vcc} = Umidade volumétrica ao nível de capacidade de campo
W-100 = 100% (sem déficit hídrico)
W-50 = 50% (déficit hídrico)
Ψ_w = Potencial hídrico
μL = Microlitros
μM = Micromol

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 <i>Objetivo Geral</i>	22
1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	23
2 REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 <i>Genótipos de Feijão-caupi</i>	24
2.1.1 BRS Novaera	24
2.1.2 BRS Pajeú	25
2.1.3 BRS Pujante	25
2.2 <i>Fenologia do feijão-caupi</i>	26
2.3 <i>Déficit hídrico na cultura de feijão-caupi</i>	27
2.4 <i>Silício na agricultura</i>	28
2.5 <i>Método de evapotranspiração e lâminas de irrigação</i>	29
3 MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 <i>Descrição da área de execução do experimento</i>	32
3.2 <i>Solo da área experimental</i>	33
3.3 <i>Delineamento experimental</i>	35
3.4 <i>Aplicação dos tratamentos</i>	36
3.5 <i>Dados meteorológicos</i>	39
3.6 <i>Variáveis analisadas</i>	41
3.6.1 <i>Análise de crescimento e fitomassa</i>	41
3.6.2 <i>Componentes de produção</i>	43
3.7 <i>Análises estatísticas</i>	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 <i>Fertilidade do solo</i>	45
4.2 <i>Macronutrientes e sódio nas folhas</i>	59
4.3 <i>Variáveis de crescimento e fitomassa</i>	65
4.4 <i>Componentes de produção</i>	77
5 CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é da família *Fabaceae* (leguminosa) que cresce nas regiões tropicais e subtropicais do planeta, sendo cultivado em todo o mundo com área plantada de cerca de 14,5 milhões de hectares e produção estimada em 6,2 milhões de toneladas (KEBEDE e BEKEKO, 2020). É uma cultura que desempenha importante função no contexto alimentar, principalmente por seu potencial nutricional, alto teor protéico e energético, de fibras alimentares e minerais. O feijão-caupi possui um ciclo médio de crescimento e produção em torno de 70 dias, a depender do genótipo e do seu hábito de crescimento (GONÇALVES et al., 2020).

Mundialmente, o Brasil se destaca como o terceiro maior produtor de feijão-caupi com média anual 2022/2023 de 620,9 mil toneladas (CONAB, 2022), porém apresenta uma baixa produtividade média devido à limitada disponibilidade hídrica e de nutrientes no solo (MARINI et al., 2012; TORRES et al., 2015). Essa cultura é cultivada em todo território nacional, destacando-se as regiões Norte e Nordeste do Brasil como maiores produtoras. Entretanto, a região Nordeste sobressai-se em produção, apresentando 1062,5 mil hectares para plantio, e os estados da Bahia, Ceará e Piauí possuem produção prevista para as safras dos anos 2022/2023 de 120,2, 111,7 e 68,3 mil toneladas, respectivamente (CONAB, 2022).

No Nordeste do país, um dos fatores responsáveis pela baixa produtividade do feijão-caupi é a deficiência hídrica, com maior intensidade nas regiões semiáridas (NASCIMENTO et al., 2011; SILVA et al., 2016), bem como no estado da Paraíba na microrregião de Catolé do Rocha-PB que podemos destacar fatores agronômicos, como a ocorrência de pluviosidades irregulares e insuficientes (< 700 mm/ano) e a alta evaporação de referência, em geral, superior a 2000 mm/ano (MENDES et al., 2007).

Dessa maneira, o déficit hídrico ocorre devido à carência de água no solo restringir a abertura estomática das folhas com prejuízos severos no sistema fotossintético, principalmente em regiões dependentes da irrigação (YOUYONGWENCH et al., 2016; MULOVEDZI et al., 2020). Além disso, com a redução da fotossíntese, acontece o decréscimo na produção de carboidratos; que posteriormente seriam armazenados pelas plantas, para serem utilizados em outras etapas vitais de seu desenvolvimento (SINGELS; DONALDSON; SMIT, 2005; ZHANG et al., 2018).

Essa situação, expressa a dependência dos sistemas de produção agrícolas à irrigação nas regiões de semiárido e exige a adoção de estratégias de manejo da água para a obtenção de rendimentos agrícolas sustentáveis, garantindo a disponibilidade de alimentos à crescente

contínua preocupação mundial (SOUZA; RIBEIRO, 2016; EL-FOTOH; EL- KADER; MANSSUR, 2019). Uma das alternativas pode ser o uso do silício (Si) na agricultura (GUNTZER; KELLER; MEUNIER, 2012) que, apesar de não ser um nutriente essencial às plantas, exerce ação atenuadora dos estresses abióticos como o hídrico, salino e nutricional (SAVVAS e NTATSI, 2015; BESHARAT; BARÃO; CRUZ, 2020).

Adicionalmente a ação positiva de atenuar os déficits, o silício também exerce ação benéfica às plantas evidenciada pelo baixo coeficiente de transpiração resultando em melhor aproveitamento da água, estímulo à produção de clorofila pelas folhas, maior rigidez estrutural dos tecidos, aumento da resistência mecânica das células, mantendo as folhas mais eretas e elevando a área de atividade fotossintética e a absorção de CO₂ (ETESAMI e JEONG, 2018; ALVES et al., 2020; BESHARAT; BARÃO; CRUZ, 2020).

Algumas pesquisas já foram realizadas sobre a aplicação exógena de silício na indução de tolerância ao déficit hídrico em algumas espécies, das quais podemos destacar: o tomate (SENARATNA et al., 2000), o feijão *Phaseolus vulgaris* (SENARATNA et al., 2000; AGOSTINI; MACHADO-NETO; CUSTÓDIO, 2013), a cevada (BANDURSKA e STROINSKI, 2005), o pepino (ÇANAKÇI e MUNZUROGLU, 2007), a melancia (SILVA et al., 2012), o trigo (SHARAFIZAD et al., 2013), o algodão (FERRAZ et al., 2014), o milho (SOUZA et al., 2014), o amendoim (CRUSCIOL et al., 2013) e a soja (CRUSCIOL et al., 2013; TEODORO et al., 2015).

Logo, sabendo-se da relevância dessa cultura para a região do Nordeste brasileiro, torna-se imprescindível a execução de pesquisas que objetivem a promoção de genótipos favoráveis a uma maior tolerância à deficiência hídrica (AGOSTINI; MACHADO-NETO; CUSTÓDIO, 2013; DUTRA et al., 2015; MELO et al., 2018), e ganhos em eficiência no uso da água (OLIVEIRA et al., 2011).

Nesse sentido, é de suma importância o conhecimento dos processos de tolerância e adaptação de cultivares de feijão-caupi ao déficit hídrico, correlacionados a aplicação via foliar do silício e as lâminas de irrigação na eficiência do uso da água, sobretudo por colaborar a designar os principais parâmetros ecofisiológicos indicativos de condescendência à deficiência hídrica, promovendo maior produtividade, rentabilidade e qualidade de vida aos produtores da região.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos da aplicação silicatada via foliar e das lâminas de irrigação na eficiência do uso da água sobre o comportamento agrônômico dos genótipos de feijão-caupi:

BRS Pajeú, BRS Novaera e BRS Pujante, propondo atenuar os efeitos deletérios da restrição hídrica em condição semiárida.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar parâmetros de crescimento e produção em genótipos de feijão-caupi sob restrição hídrica e tratados com silício via foliar;
- b) Quantificar pelos valores de umidade, no solo com 100% e 50% da evaporação de referência (ET_0), a redução das perdas de água que expressam a economia hídrica no cultivo durante a época da estiagem ou período de aridez;
- c) Analisar o status hídrico e o aparato fotossintético de cultivares de feijão-caupi submetidos à restrição hídrica do solo, com e sem aplicação exógena de silício;
- d) Medir os resultados da interação entre silício e lâminas de irrigação sobre os efeitos isolados de cada fonte de variação no crescimento e produção de grãos de feijão-caupi;
- e) Identificar qual cultivar foi mais responsiva a aplicação de silício sob restrição hídrica do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Genótipos de Feijão-caupi

O feijão-caupi conhecido também por feijão macassar ou feijão-de-corda é uma leguminosa granífera de ciclo fotossintético C3, pertencente à família Fabaceae (CRUZ et al., 2012), apresentando grande importância na alimentação das populações que vivem em regiões semiáridas do Brasil, pois fornece um alto valor nutritivo, sendo um dos principais componentes da dieta alimentar, gerando também emprego e renda, tanto na zona rural quanto na zona urbana (LIMA, 2004). É cultivado por grandes, médios e pequenos produtores devido à sua plasticidade sob restrição hídrica (RIVAS et al. 2016; PESSOA; FREIRE; COSTA, 2017). Porém, houve uma grande dificuldade para a classificação da espécie domesticada, em razão da grande variabilidade genética existente na própria espécie (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) e nas espécies silvestres geneticamente mais próximas (FREIRE FILHO, 2011). O feijão-caupi, inicialmente, foi classificado nos gêneros *Phaseolus* e *Dolichos*, até ser classificado no gênero *Vigna*, o qual foi estabelecido por Savi em 1894 (SELLSCHOP, 1962).

2.1.1 BRS Novaera

A cultivar BRS Novaera corresponde à linhagem MNC00-553D-8-1-2-2, obtida do cruzamento entre as linhagens TE97-404-1F e TE97-404-3F, os cruzamentos foram realizados na Embrapa Meio-Norte, na cidade de Teresina no estado do Piauí, no ano de 2000. Possui porte semi-ereto, apresenta ramos laterais curtos e tem a inserção das vagens um pouco acima do nível da folhagem. Tem o folíolo central semilanceolado. A cor das vagens na maturidade fisiológica e de colheita é amarelo-clara, podendo apresentar pigmentação roxa nos lados das vagens. Tem grãos de cor branca, grandes, reniformes e com tegumento levemente enrugado e anel do hilo marrom (FREIRE FILHO et al., 2008).

Sendo avaliada principalmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, se faz adequada tanto à agricultura empresarial como à agricultura familiar. Voltada para a agricultura empresarial, a vantagem é que pode ser colhida mecanicamente. Já para a familiar, a vantagem de ser precoce e, como as vagens alcançam a maturidade em período concentrado, pode ser colhida de uma só vez, por meio do arranquio ou do corte das plantas. Sendo reconhecida também tanto no mercado nacional quanto no mercado internacional (FREIRE FILHO et al., 2008).

A sua produção ainda é insuficiente em algumas regiões, devido ao manejo estar sujeito a condições de escassez hídrica, expondo dessa forma a cultura ao déficit hídrico (BASTOS et al., 2012). Apesar disso, seu potencial produtivo foi comparado com as cultivares Vita-7, proposta para estados das regiões Norte e Nordeste, e com a BRS Guariba, cultivar essa recomendada nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Nos estados da região Nordeste, especificamente no Maranhão, a cultivar BRS Novaera, possui média de produtividade de 1.054,1 kg/há. E no Rio Grande do Norte, com uma média de 1.546,9 kg/ha, superou a cultivar BRS Guariba em 16 % e a Vita-7 em 8 % (FREIRE FILHO et al., 2008).

2.1.2 BRS Pajeú

A cultivar BRS Pajeú possui porte semi-prostrado e a vagem levemente incorporada acima da folhagem. Dispões de grãos mulato-claros, bem formados. De fácil colheita manual, no padrão de preferência de uma grande faixa de consumidores, rica em ferro e zinco e com cozimento rápido. Apresenta ciclo de 70 a 75 dias, resistência moderada ao mosaico severo do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), ao mosaico transmitido por pulgão, ao mosaico dourado, ao oídio e a mancha do café (EMBRAPA, 2009).

Dessa forma, a cultivar é indicada para cultivo por agricultores familiares e empresariais, em regime de sequeiro ou irrigado, destacando-se principalmente nos ecossistemas de caatinga, cerrado e tabuleiros costeiros da região Nordeste. A produtividade média em cultivo de sequeiro e irrigado foi de 1.109 kg ha⁻¹ e 1.863 kg há⁻¹, respectivamente. Na região Nordeste é indicada para cultivo, principalmente nos estados do Maranhão, Piauí, Pernambuco, Alagoas e Sergipe; na região Norte, em Roraima; e na região Centro-Oeste nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (EMBRAPA, 2009).

2.1.3 BRS Pujante

A cultivar BRS Pujante foi desenvolvida pela Embrapa Semiárido, por meio do cruzamento de linhagens dos genótipos 'TE 90-180-26F' e 'Epace 10', ambos indicados para áreas irrigadas. É do tipo feijão-caupi, sempre verde, com grãos e vagens compridas, apresentando hábito de crescimento indeterminado, porte semi-determinado, folha globosa, cor da flor roxa e desuniforme, cor da folha no início do florescimento verde e inserção das vagens acima da folhagem (SOUZA et al., 2016).

Foi elaborada para áreas de sequeiro, no primeiro semestre, e irrigadas, no segundo semestre, demonstrando um ciclo médio de 70 dias até a primeira colheita. Apresentou ampla adaptação e boa previsibilidade nos ambientes avaliados, com a produtividade média de 704 kg/ha em condições de sequeiro, 1586 kg/ha em condições irrigadas e de 1057 kg/ha, no conjunto dos ambientes (SANTOS et al., 2008).

Porém, existem algumas lacunas a serem preenchidas para o correto manejo de irrigação do feijão-caupi, especialmente para a “BRS Pujante”, que é uma cultivar de elevada produtividade, pois não dispõem de registros experimentais conclusivos quanto aos valores de coeficientes de cultura (Kc, especialmente o Kc dual), duração dos estádios fenológicos e estratégias de controle do uso da água (SOUZA et al., 2016).

2.2 Fenologia do feijão-caupi

O conceito de fenologia refere-se ao estudo dos fenômenos periódicos da vida vegetal em função da sua reação às condições do ambiente e a correlação com os aspectos morfológicos da planta (OLIVEIRA et al., 2018). Em relação ao ciclo de vida do feijão-caupi, é marcado por duas etapas bem distintas: a fase vegetativa e a fase reprodutiva. A fase vegetativa é subdividida em 10 fases e a reprodutiva em 5 subfases (Tabela 1).

Tabela 1. Fases e subfases do ciclo vegetativo e reprodutivo do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) segundo a classificação de Moura et al. (2012).

Fases	Subfases	Características
Vegetativa	V0	Semeadura;
	V1	Os cotilédones encontram-se emergidos na superfície do solo;
	V2	As folhas unifolioladas encontram-se completamente abertas, suas margens estão completamente separadas;
	V3	A primeira folha trifoliolada encontra-se com os folíolos separados e completamente abertos;
	V4	A segunda folha trifoliolada encontrasse com os folíolos separados e completamente abertos;
	V5	A terceira folha trifoliolada encontra-se com os folíolos separados e completamente abertos;
	V6	Os primórdios do ramo secundário surgem nas axilas das folhas unifolioladas ou nas axilas das primeiras folhas trifolioladas;
	V7	A primeira folha do ramo secundário encontra-se completamente aberta;
	V8	A segunda folha do ramo secundário encontra-se completamente aberta;
	V9	A terceira folha do ramo secundário encontra-se completamente aberta;
	R1	Surgem os primórdios do primeiro botão floral no ramo principal;

Reprodutiva	R2	Antese da primeira flor, geralmente oriunda do primeiro botão floral;
	R3	Início da maturidade da primeira vagem, geralmente oriunda da primeira flor (início da mudança de coloração das vagens – secagem);
	R4	Maturidade de 50% das vagens da planta;
	R5	Maturidade de 90% das vagens da planta.

Fonte: Moura et al. (2012)

2.3 Déficit hídrico na cultura de feijão-caupi

O feijão-caupi é caracterizado como uma planta sensível, tanto ao déficit hídrico quanto ao excesso de água no solo (NÓBREGA et al., 2001), bem como é cultivado predominantemente em regiões semiáridas (AGBICODE et al., 2009), principalmente no Nordeste do país, onde a deficiência hídrica é condição comum (HALL et al., 2003; MUCHERO et al., 2009), sendo um dos principais fatores que reduzem seu máximo potencial produtivo (MENDES et al., 2007; EMBRAPA, 2009).

O déficit hídrico é determinado pela redução na disponibilidade de água no solo, como também pela morfologia, respostas fisiológicas e bioquímicas das plantas à falta de água (IHUOMA e MADRAMOOTOO, 2017). Em relação a cultura de feijão-caupi, alguns efeitos deletérios são identificados na presença de deficiência hídrica, nos quais podemos destacar: perda de turgor celular, provocando alterações fisiológicas, restringindo alongamento e divisão celular, redução da área foliar e total matéria seca (FREITAS et al., 2017), diminuição da condutância estomática com aumento na resistência difusiva ao vapor de água, através do fechamento dos estômatos, reduzindo a transpiração, afetando o suprimento de CO₂ e, conseqüentemente, inibindo a fotossíntese (OLIVEIRA; FERNANDES; RODRIGUES, 2005; SILVA et al., 2010; FREITAS et al., 2017), e aumento nos níveis de espécies reativas de oxigênio (EROs) (DUTRA et al., 2015). Além disso, causa desidratação do protoplasto, decorrendo de diminuição do volume celular, aumento na concentração de solutos (NOGUEIRA; ALBUQUERQUE; SILVA, 2005), alteração de rotas de sinalização, síntese e degradação de substâncias (CARVALHO et al., 2019), propiciando em reduções nos componentes de produção, principalmente nas fases de floração e frutificação (SOUZA et al., 2009).

Diante do exposto, o cultivo do feijão-caupi merece bastante atenção, tendo em vista que a redução da disponibilidade hídrica do solo, provoca sérios prejuízos à cultura, principalmente durante o período verânico (PEIXOTO, 2011; FERNANDES et al., 2015).

Vale salientar que o feijão-caupi possui um elevado potencial genético para atingir maiores produtividades quando em cultivo irrigado (MOUSINHO; ANDRADE JÚNIOR; FRIZZONE, 2008; BLANCO et al., 2011; RAMOS et al., 2012). Com isso, se faz necessário um manejo adequado visando a sua produtividade, e para que isso ocorra é imprescindível informar-se sobre a capacidade de respostas aos níveis de déficit hídrico, bem como a relação entre o consumo de água e a produtividade. Baseando-se nisso, o produtor poderá optar por cultivares propícias às atuais circunstâncias edafoclimáticas (NASCIMENTO; PEDROSA; TAVARES SOBRINHO, 2004).

2.4 Silício na agricultura

Alguns elementos considerados benéficos para as plantas são classificados como essenciais, pois atuam no melhoramento de certas respostas, como o crescimento, o desenvolvimento e o desempenho frente a estresses bióticos e abióticos (TEMIZ et al., 2017). Com isso, a aplicação de substâncias mitigantes com a finalidade de atenuar os efeitos do déficit hídrico, associado com os mecanismos endógenos das plantas, surge como uma alternativa promissora (ALMEIDA NETO, 2020), dentre esses atenuadores destaca-se o silício (Si).

Diante do exposto, o silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, com 27,7%, estando atrás apenas do oxigênio. Encontrado na forma de óxidos (SiO_2) na natureza ou como minerais silicatados (SRIPANYAKORN et al., 2005; DECHEN; NACHTIGALL, 2006). Por esse motivo, alguns materiais podem ser utilizados como fonte de Si para as plantas, dentre eles estão aqueles aplicados via solo em pó ou granulado, na forma de silicatos de Ca e de Mg, ou na forma líquida com a aplicação via foliar, como é o caso do silicato de K (KORNDÖRFER e SOUZA, 2018) e o ácido silícico (Si(OH)_4). Vale enfatizar que a maior concentração de silício se localiza nos tecidos de suporte do caule e das folhas das plantas, com 99% desse elemento na forma de ácido silícico polimerizado, apresentando reduzida solubilização, conseqüentemente baixa redistribuição (MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015).

Por ser um elemento considerado benéfico, está relacionado com variados efeitos nas plantas, como aumento da atividade fotossintética (LANA et al., 2003; LIANG; SUN; SI, 2005; MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015), redução da taxa respiratória (LANA et al., 2003; ZHANG et al., 2017), estímulo da resistência das plantas a pragas e doenças (LANA et al., 2003; POZZA et al., 2004), aumento da resistência ao acamamento, redução do

efeito tóxico do Mn, Fe, Al e Na, aumento na absorção de outros elementos, como o fósforo (LANA et al., 2003), produção de uma barreira contra a perda de água (KORNDORFER; PEREIRA; CAMARGO, 2002). Além de um bom desenvolvimento da arquitetura foliar das plantas (MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015), através das células epidérmicas permitindo que as folhas fiquem mais eretas, induzindo maior absorção de CO₂ e aumentando a eficiência fotossintética, além do teor de clorofilas (FERRAZ et al., 2014; ZANETTI et al., 2016), resistência ao ataque de microrganismos fitopatogênicos, indução de reações metabólicas que formam compostos como fitoalexinas e lignina que beneficiam as plantas na tolerância à seca (POZZA et al., 2004).

Ademais, potencializa a atividade de enzimas como quinases, peroxidases e polifenoloxidasas (LIANG; SUN; SI, 2005), atua na modificação do mecanismo de troca gasosa, na modificação dos osmólitos e fitormônios (ZHANG et al., 2017), permite um bom desempenho da atividade radicular (promovendo a absorção de água e nutrientes, principalmente nitrogênio, fósforo e potássio), protege contra temperaturas extremas e ao estresse salino, beneficia a massa individual das sementes e a fertilidade dos grãos de pólen, a produção de carboidratos e açúcares, bem como promove a formação de nódulos em leguminosas e a fixação simbiótica do nitrogênio (LIMA FILHO, 2006). Logo, todos esses os fatores propiciados pelo o silício apresentam grandes vantagens, principalmente no cultivo de feijão-caupi, relacionado ao aumento do crescimento e da sua produtividade.

Como visto, o silício possui uma relevante função nas relações planta-ambiente, proporcionando às culturas determinadas condições para suportar as questões climáticas, edáficas e biológicas (LIMA FILHO, 2006). O feijão-caupi é suscetível a redução da produtividade devido ao déficit hídrico, porém, algumas pesquisas que correlacionam as mudanças bioquímicas, fisiológicas e as variáveis de crescimento e produção de plantas desse feijoeiro sobre a influência da deficiência hídrica e a aplicação via foliar do silício, ainda são escassas ou basicamente inexistentes para esse tipo de cultura (ARAÚJO, 2017).

2.5 Método de evapotranspiração e lâminas de irrigação

A irrigação é um método utilizado na agricultura que complementa a precipitação natural (CASTRO et al., 2016). Dessa forma, é considerada uma das principais alternativas para contornar os problemas da deficiência hídrica, uma vez que seu objetivo é oferecer o suprimento hídrico necessário para o adequado crescimento e desenvolvimento das culturas (GOMIDE e MAEMO, 2008; BASTOS; ANDRADE JÚNIOR; CARDOSO, 2017),

principalmente quando há o enriquecimento do solo com deposição de fertilizantes (CASTRO et al., 2016).

Sabe-se que o agricultor habitualmente irriga sua produção em excesso para evitar o déficit hídrico, prejudicando assim a sua cultura, já que não há utilização de um método adequado (TURCO; RIZZATTI; PAVANI, 2009). Dessa maneira, a seleção de um manejo de irrigação é crucial para o excelente desenvolvimento da lavoura, promovendo uma diminuição dos gastos de água (CASTRO et al., 2016), melhoramento da qualidade dos produtos agrícolas, oferecendo maiores produtividades com menores custos e forma sustentável (FREITAS et al., 2010). Portanto, para a análise do método que deve ser empregado, é necessário compreender a necessidade hídrica da cultura, utilizando a estimativa da evapotranspiração (ET_c), compreendida pela evapotranspiração de uma cultura referência (ET_0) multiplicado por um coeficiente de cultura (k_c) (CASTRO et al., 2016), sendo este método mais utilizado devido sua maior funcionalidade e menor obrigatoriedade de mão-de-obra (OLIVEIRA et al., 2008).

Sendo assim, a evapotranspiração de referência (ET_0) pode ser definida de duas maneiras: direta ou indireta, no qual, a determinação direta é medida através de equipamentos conhecidos como lisímetros ou evapotranspirômetros. E pela forma indireta pode ser determinada por meio equações empíricas, as quais têm sido propostas para estimar a evapotranspiração de referência ET_0 (SIMEÃO et al., 2016). Nessa última, utilizando técnicas dos balanços de água e energia, sendo preferíveis por sua aplicabilidade, vigor e menores custos (LIMA, 2004).

No manejo de irrigação citado, os instrumentos aplicados constantemente são o tanque Classe A e a estação meteorológica automática, no qual o tanque Classe A baseia-se na medição da evaporação da água, esse valor é convertido em evapotranspiração de referência através de coeficientes intrínsecos que dependem do tipo de tanque, clima e da bordadura circundante (ALLEN et al., 1998), ou seja, o operador mede a lâmina de água evaporada e a lâmina precipitada, com uso de pluviômetro e, em seguida, desenvolve os cálculos necessários de quando e quanto irrigar (OLIVEIRA et al., 2008). Já no uso da estação meteorológica automática se faz necessário a aquisição da estação, computador com programas específicos, manutenção, assistência técnica especializada, além do conhecimento técnico do irrigante. Logo, esse instrumento não é tão aceito pelos agricultores, devido aos seus elevados custos que impossibilitam a sua utilização (OLIVEIRA et al., 2008).

Alguns estudos estão sendo aplicados com o objetivo de viabilizar essa técnica economicamente no cultivo de área irrigada, relacionada ao feijão. Porém, os resultados

alcançados foram inconclusivos e diferentes em relação a indicação de melhor lâmina de irrigação para a cultura, além disso, algumas das pesquisas foram realizadas com *Phaseolus vulgaris*, o que torna totalmente diferente para cultivares da espécie *Vigna unguiculata* (ANDRADE JÚNIOR et al., 2002).

Para que haja o sucesso no manejo e dimensionamento na irrigação de uma cultura é indispensável conhecer a resposta da cultura à água e dispor de conhecimento da evapotranspiração (ETc) e do coeficiente de cultivo (Kc), possibilitando um planejamento, projeto e método de irrigação relacionado a deficiência hídrica (ENGLISH, 2002; SILVA et al., 2006), já que os resultados são baseados pelas cultivares utilizadas e pelas condições edafoclimáticas da região.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de execução do experimento

O experimento foi conduzido entre os meses de setembro a dezembro de 2021, nas dependências do Centro de Ciências Humanas e Agrárias, pertencente a Universidade Estadual da Paraíba, localizada na cidade de Catolé do Rocha, no estado da Paraíba, situado na Mesorregião do Alto Sertão paraibano, pelos pontos das coordenadas geográficas: latitude $6^{\circ} 20' 38''$ Sul, longitude $37^{\circ} 44' 48''$ a Oeste do Meridiano de *Greenwich* e a uma altitude de 275m (Figura 1).

Figura 1. Localização da área experimental. Catolé do Rocha, PB, 2021.



Fonte: google maps, 2023.

O clima da região de acordo com a classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013) é BSh semiárido quente com chuvas de verão e, segundo a divisão do estado da Paraíba em regiões bioclimáticas, o bioclima é 4bTh com período sem chuvas de 5 a 7 meses. A estação chuvosa dura de janeiro a julho com maior frequência e intensidade nos meses de fevereiro, março e maio.

3.2 Solo da área experimental

O solo da área experimental, segundo os critérios do Sistema Brasileiro de Classificação — SiBCS, foi classificado como Neossolo Flúvico Eutrófico (EMBRAPA, 2018). Antes da instalação do experimento, amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm para caracterização do mesmo (Figura 2A/Figura 2B) Quanto à umidade do solo, foi monitorada através da estufa de secagem a 105°C por 48 horas (Figura 2C), conforme EMBRAPA (1997). Para a execução deste método empregou-se a massa de solo úmido (m_u), em seguida depositado em estufa de secagem a 105-110°C até massa constante, aproximadamente 24 horas. A massa constante registrou com a massa de solo seco (m_s) e com a equação 1, determinando a umidade atual à base de peso (U).

Equação 1:

$$U(\%) = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \times 100$$

Figura 2. Coleta do solo do experimento para análise (A/B). Secagem das amostras de solo em estufa (C). Catolé do Rocha, PB, 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

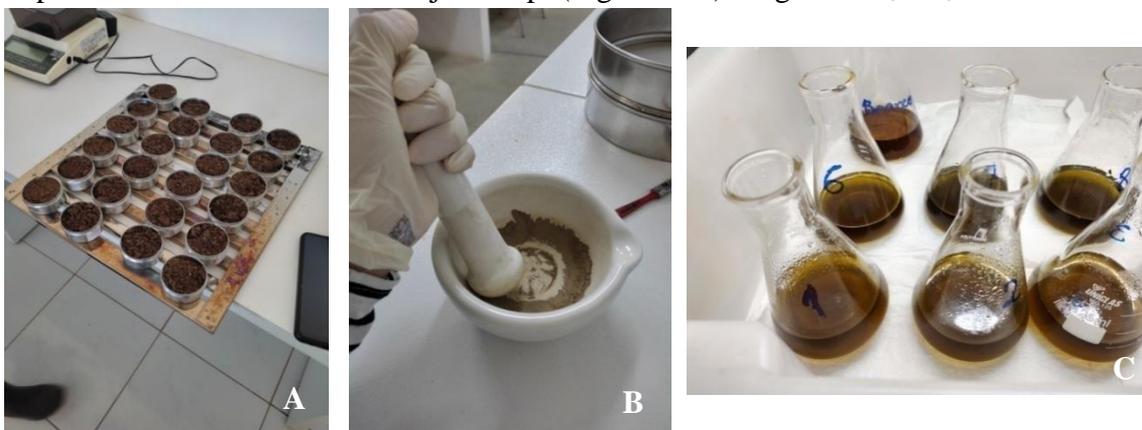
Quanto à fertilidade e aos atributos físicos foram coletadas amostras compostas de solo na camada de 0-20 cm (Figura 3A) e transformadas em uma amostra por subparcela (Tabela 2), empregando as metodologias contidas no manual da EMBRAPA (TEIXEIRA et al., 2017) (Figura 3B/Figura 3C).

Tabela 2. Caracterização química, quanto à fertilidade, e física do solo da área experimental.

Atributos químicos		Atributos físicos	
pH em água (1.0:2.5)	6,40	Areia (g kg ⁻¹)	661,00
MOS (g kg ⁻¹)	11,59	Silte (g kg ⁻¹)	213,00
P (mg dm ⁻³)	25,00	Argila (g kg ⁻¹)	126,00
Si (mg dm ⁻³)	10,00	Ada (g kg ⁻¹)	42,00
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	2,04	Gf (%)	66,70
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	6,01	Id (%)	33,30
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	2,10	Ds (g cm ⁻³)	1,51
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,07	Dp (g cm ⁻³)	2,76
Ca ²⁺ /Mg ²⁺	2,86/1	Pt (%)	45,00
SB (cmol _c dm ⁻³)	11,31	M (%)	31,90
(H ⁺ +Al ³⁺) (cmol _c dm ⁻³)	0,00	m (%)	13,10
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00	Uvcc (g kg ⁻¹)	131,40
CTC (cmol _c dm ⁻³)	11,31	Uvpmp (g kg ⁻¹)	49,70
V (%)	100,00	Adi (g kg ⁻¹)	81,70
Classificação	Eutrófico	Classificação textural	FAA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

MOS = Matéria orgânica do solo; SB = Soma de bases trocáveis (SB = Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺+Na⁺); CTC = Capacidade de troca catiônica [CTC = SB (Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺+Na⁺)]; V = Saturação do solo por bases trocáveis [V = (SB/CTC) x 100]; Ada = Argila dispersa em água; Df = Grau de floculação {Gf = [(Argila-Ada)/Argila] x 100}; Ds e Dp = respectivamente densidade do solo e de partículas; Pt. M e m = Respectivamente. Porosidade total. Macro e microporosidade do solo; Uvcc.Uvpmp = Respectivamente. umidade volumétrica ao nível de capacidade de campo e do ponto de murchamento permanente nas tensões de -0.033 e -1.500Mpa do solo; Adi = Água disponível no solo; FAA = Franco argilo arenosa.

Figura 3. Coleta de solo da área experimental (A). Avaliação das amostras de solo coletado no experimento das cultivares de feijão-caupi (Figura B/C). Lagoa Seca, PB, 2022.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.3 Delineamento experimental

O experimento foi distribuído em arranjo de parcela subdividida [$2 \times (2 \times 2)$], em blocos casualizados, com quatro repetições e 30 plantas por unidade experimental. A parcela principal foi referente às lâminas de irrigação (50% e 100% ET₀) e as subparcelas pelos genótipos de feijão-caupi (BRS Novaera – G1, BRS Pujante – G2 e BRS Pajeú – G3) (Figura 4) com e sem aplicação de ácido silícico (com 600 mg.L⁻¹ de silício e sem (0 mg.L⁻¹), conforme apresentado no croqui (Figura 5).

Figura 4. Genótipos de feijão-caupi utilizados no experimento, BRS Novaera (A), BRS Pujante (B), BRS Pajeú (C). Catolé do Rocha, PB, 2021.

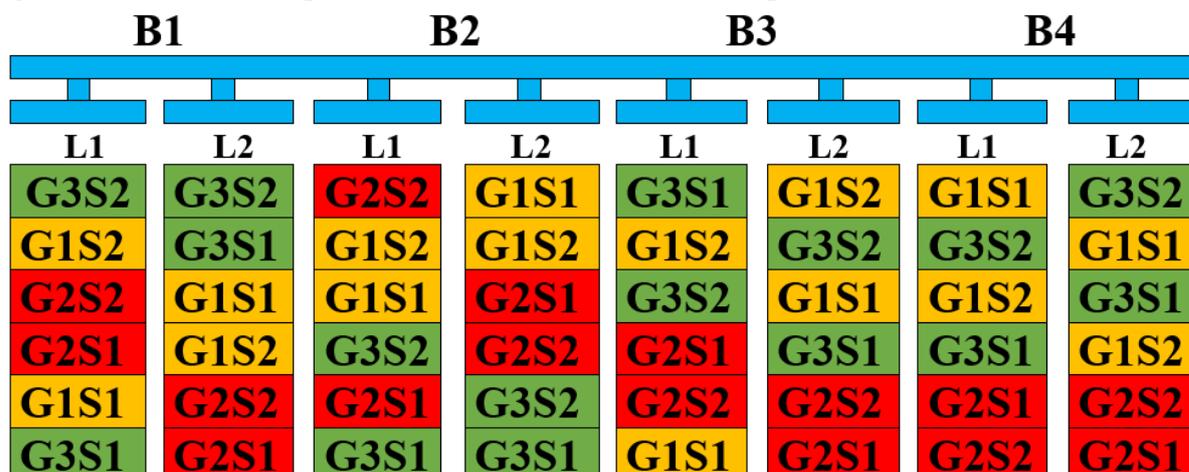


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As parcelas experimentais foram compostas por um metro de largura e onze metros de comprimento, espaçadas uma da outra por um metro. As subparcelas mediram um metro de largura e um metro de comprimento, sendo compostas por três linhas de irrigação contendo 30 plantas por parcela, espaçadas de uma da outra por 0,50 metros.

O espaçamento entre plantas na parcela foi 0,5 m entre linhas e de 10 cm entre plantas, resultando em 30 plantas por parcela, 360 plantas por bloco, multiplicado por quatro repetições, totalizando 1440 plantas, das quais três plantas da linha central foram consideradas parcela útil para avaliações das variáveis de crescimento e fitomassa de feijão-caupi.

Figura 5. Croqui do experimento em campo com genótipos do feijão-caupi. Legenda: L1= Reposição de evapotranspiração de referência (ET0): 100%; L2= Reposição de evapotranspiração de referência (ET0): 50%; G1= BRS Novaera; G2= BRS Pujante; G3= BRS Pajeú; S1= Com silício aplicado via foliar; S2= Sem silício aplicado via foliar.



Fonte: Caio da Silva Sousa, 2021

3.4 Aplicação dos tratamentos

As plantas foram irrigadas diariamente com água de restrição moderada à agricultura com condutividade elétrica de 1,01 dS m⁻¹ (AYERS & WESTCOT, 1999), caracterizada conforme Richards (1954) (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização química da água utilizada no experimento.

pH	CE _{ai}	SO ₄ ⁻²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻³	Cl ⁻	RAS	Classe
	mmol _c L ⁻¹								(mmolL ⁻¹) ^{1/2}	
6,9	1,01	0,18	1,48	6,45	1,21	2,50	0,00	2,75	8,1	4,57	C ₂ S ₁

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ceai = Condutividade elétrica da água de irrigação; RAS = Razão de adsorção de sódio [RAS= Na⁺/(Ca²⁺+Mg²⁺)/2].

O método de aplicação foi o localizada, utilizando fitas gotejadoras com emissores espaçados de 0,2 m vazão de 1,6 L h⁻¹, trabalhando na pressão de serviço de 0,1 MPA. (Figura 6A/Figura 6B).

Figura 6. Método de evapotranspiração de irrigação, por meio de fitas gotejadoras (A/B).
Catolé do Rocha, PB, 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A evapotranspiração da cultura – ET_c foi obtida pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ET_0 , mm dia^{-1}), estimada a partir dos dados de evaporação do tanque Classe ‘A’ corrigida pelo K_t do tanque (0,75); e o coeficiente de cultura – k_c nas diferentes idades das plantas ($ET_c = ET_0 \times K_c$). Os valores da irrigação (mm fase^{-1}) durante a condução do experimento, conforme dados mensais demonstrados na Tabela 4. A salinidade da água foi monitorada mensalmente durante a irrigação pela condutividade elétrica em condutivímetro de balcão.

Tabela 4. Valores da irrigação (mm fase^{-1}) durante a condução do experimento.

Fases	Sub fases	Lâminas (mm fase^{-1})	
		50%	100%
Vegetativa	V0	7,79	15,57
	V1	4,61	9,22
	V2	9,57	19,13
	V3	11,84	23,68
	V4	9,98	19,97
	V5	14,14	28,28
	V6	18,11	36,22
	V7	17,53	35,07
	V8	17,98	35,95
	V9	12,54	25,08
Reprodutiva	R1	15,83	31,66
	R2	16,84	33,69
	R3	19,42	38,84
	R4	18,56	37,13
	R5	27,96	55,92
Total		222,69	445,39

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022..

Para obtenção do uso consuntivo das plantas (U_c), considerou-se o percentual de área molhada (P) = 100%. Dessa forma, o cálculo da lâmina de irrigação líquida diária ($LLD = E_{Tc}$) para $LLD = U_c \times P/100$ (mm d^{-1}); a partir deste valor, determinará as lâminas fornecidas correspondentes a 50% e 100% LLD , sendo as parcelas independentes, as lâminas fornecidas pela a diferenciação do tempo de irrigação. Inicialmente, o solo foi irrigado até a condição de capacidade de campo, posteriormente, realizou-se a semeadura adotando-se duas sementes por cova em profundidade padrão de 3 cm. Transcorridos cinco dias da emergência, realizou-se, deixando uma planta por cova.

As adubações de fundação e cobertura foram feitas conforme sugestão do Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA, 2008) e o controle de insetos, doenças e de plantas invasoras feito conforme as necessidades durante a execução do experimento.

As pulverizações nas folhas foram realizadas nas fases fenológicas com 200 mg.L^{-1} da solução por parcela, composto por três pulverizações: estágio V5 (terceira folha trifoliada encontra-se com os folíolos separados e completamente abertos) o estágio V9 (terceira folha do ramo secundário encontra-se completamente aberta) e estágio R2 (antese da primeira flor, geralmente oriunda do primeiro botão floral) (Figura 7A/Figura 7B).

Figura 7. Aplicação dos tratamentos com ácido silícico, utilizando pulverizador costal (A/B). Catolé do Rocha, PB, 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O silício foi fornecido na forma de dióxido de silício amorfo sintético (910 g kg^{-1} de SiO_2), composto de nanopartículas de SiO_2 com elevada atividade superficial devido à alta densidade do radical silanol ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (Tabela 5).

Tabela 5. Composição química do silício.

Garantias	
SiO ₂ (%)	92
Si (%)	42,9
Densidade Aparente (g/l)	80 -140
Tamanho da partícula (um)	80-12
pH	6,0 – 7,5

Fonte: Sifol, 2022.

3.5 Dados meteorológicos

A temperatura média superficial do solo nas lâminas de 50% e 100% da evapotranspiração de referência, com e sem a aplicação de silício, foi aferida com um termômetro digital da marca Incoterm (Figura 8A/Figura8B), colocando-o sobre a superfície e profundidade (5 cm e 10 cm) do solo (Tabela 6).

Figura 8. Análise da temperatura superficial (A) e de profundidade (B) do experimento das cultivares de feijão-caupi. Catolé do Rocha, PB, 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Tabela 6. Valores médios da temperatura superficial do solo.

Temperatura superficial do solo (°C)											
Lâminas de irrigação (50% da ETo)						Lâminas de irrigação (100% da ETo)					
Com silício			Sem silício			Com silício			Sem silício		
42,92	30,13	29,18	46,41	31,49	29,87	32,79	28,02	27,65	36,20	29,15	28,54

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Em relação aos parâmetros do ar foram registrados os valores diários para avaliação semanal, quinzenal e mensal da evaporação do tanque classe “A”, umidade relativa do ar, velocidade do vento, no local do experimento fornecidos pela estação meteorológica classe 'A' da UEPB, Campus IV de Catolé do Rocha, PB (Tabela 7). A temperatura máxima, mínima e média foram avaliadas por meio da utilização do medidor do IBUTG, modelo ITWBG 2000 (Figura 9).

Tabela 7. Dados médios mensais da temperatura e umidade relativa do ar, evaporação de referência e pluviosidade, Catolé do Rocha-PB, 2021.

Meses	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Evaporação de referência (mm mês ⁻¹)	Pluviosidade (mm mês ⁻¹)
Setembro	36,22	43,91	8,22	9,80
Outubro	36,19	47,63	8,24	13,00
Novembro	36,41	45,27	8,56	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 9. Determinação da temperatura do ar entre os blocos casualizados. Catolé do Rocha, PB, 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.6 Variáveis analisadas

3.6.1 Análise de crescimento e fitomassa

Aos 45 dias após a semeadura (DAS), quando as plantas encontravam-se no estágio R2 (antese da primeira flor, geralmente oriunda do primeiro botão floral), foram analisados o comprimento do ramo principal (CRP), medido do colo à base da folha mais jovem da planta com régua graduada em centímetros (Figura 10A); diâmetro caulinar (DC), aferido com um paquímetro digital modelo Stainlees Steel, com as leituras sendo efetuadas a 1 cm de altura na região do colo de cada planta (Figura 10B); e Área foliar (AF), obtida relacionando-se a massa seca de 8 discos foliares, com a massa seca total das folhas por planta de acordo com a seguinte equação:

$$AFP = \left(\frac{MSF \times AFD}{MSD} \right)$$

Onde AFP = área foliar (cm² por planta), MSF = massa seca das folhas (g), AFD = área foliar dos discos (cm²), MSD = massa seca dos discos (g).

Figura 10. Análise de crescimento e fitomassa, através do comprimento, diâmetro, altura e massa seca (A/B) em cultivares de feijão-caupi. Catolé do Rocha, PB, 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Posteriormente, o material vegetal colhido foi separado em raízes, caules, folhas, acondicionado em sacos de papel kraft e seco em estufa de circulação de ar a temperatura de 60°C até atingir peso constante e pesados em uma balança com precisão de 0,0001g (Figura

11A). De posse desses dados, obteve-se a Massa seca radicular (MSR) e a Massa seca da parte aérea (Folhas + Caule) (MSPA). A obtenção da Massa seca total (MST) se deu através da soma dos pesos de seca da parte aérea e raiz (Figura 11B).

Figura 11. Determinação da fitomassa, através de secagem (A) e pesagem (B) das cultivares de feijão-caupi. Catolé do Rocha, PB, 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para a determinação da taxa de crescimento relativo da parte aérea (TCRA) e do ganho relativo de fitomassa da parte aérea (GRFA), essas variáveis foram obtidas por meio da relação:

$$R = \frac{\ln W2 - \ln w1}{t2 - t1}$$

Em que R= taxa de crescimento ou ganho relativo; ln = logaritmo neperiano; W1 = diâmetro ou fitomassa inicial no estágio V7; W2 = diâmetro ou fitomassa final no estágio V7; t1 = tempo inicial no estágio V7 e t2 = tempo final no estágio V7; W1 = diâmetro ou fitomassa inicial no estágio R2; W2 = diâmetro ou fitomassa final no estágio R2; t1 = tempo inicial no estágio R2 e t2 = tempo final no estágio R2, sendo duas avaliações em cada estágio fenológico totalizando seis avaliações (ECHER et al., 2010).

A obtenção da taxa de crescimento absoluto (TCA em dia-1) ocorreu através da altura de planta por meio das relações apresentadas em Benincasa (2003) e Floss (2004):

$$TCA = \frac{M2 - M1}{T2 - T1}$$

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

A eficiência de uso da água (EUA) foi obtida pelo quociente entre a matéria seca total e o volume total de água aplicado durante a condução do experimento:

$$EUA = \frac{MST (g)}{\text{Consumo de água (ml)}}$$

3.6.2 Componentes de produção

No final do experimento, houve a análise da produção de feijão-caupi, baseada na determinação da produção total, realizada pela colheita de três plantas úteis de cada parcela, as quais foram colhidas no estágio de maturação completo, ou seja, grãos secos. Após este processo, foram avaliadas as seguintes características agronômicas: a) comprimento de vagens (CV), determinada pela medição do comprimento de 10 vagens por subparcela (Figura 12A); b) número de grãos por vagem (NGV), realizada pela contagem do número de grãos das mesmas vagens da variável anterior (Figura 12B); c) número de vagens por planta (NVP), dividindo-se o número total de vagens pelo de plantas da área útil; d) peso de cem grãos (PCG); e) rendimento de grãos (kg ha^{-1}) determinado pelo peso de grãos por planta em gramas (PGP), dividindo-se o peso de grãos pelo número de plantas encontradas na área útil (Figura 12C). O peso de grãos, em kg, por área útil, foi corrigido para 13% de umidade (BORTOLOTTI, 2005).

Figura 12. Análise dos fatores de produção, através do comprimento das vagens (A), números (B) e peso de grãos (C) das cultivares de feijão-caupi. Catolé do Rocha, PB, 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.7 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos erros e homogeneidade das variâncias; e posteriormente, atendidos os pressupostos, foram submetidos às análises de variância pelo teste F com no mínimo 95% de confiança, quando significativo, as médias dos níveis de reposição da ET_0 , silício e genótipos de feijão-caupi foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro. Para a realização das análises foi utilizado o software estatístico Rbio (BHERING, 2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fertilidade do solo

Verificou-se que o teste F para a interação silício x genótipos de feijão-caupi (Si x Ge) foi significativa ($P < 0,01$) nos valores de pH, concentrações de potássio (K^+), de sódio (Na^+), capacidade catiônica do solo (CTC), condutividade elétrica (CE), fósforo (P) e matéria orgânica do solo (MOS). Além disso, observou-se efeito significativo da interação lâmina x genótipos de feijão-caupi e lâminas x silício para as concentrações de cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) no solo, respectivamente, indicando dependência desses fatores (Tabela 8).

Tabela 8. Resumo da análise de variância para as variáveis Potencial hidrogeniônico na solução do solo (pH), Condutividade elétrica na solução do solo (CE), Fósforo na solução do solo (P), Potássio na solução do solo (K⁺), Sódio na solução do solo (Na⁺), Cálcio na solução do solo (Ca²⁺), Magnésio na solução do solo (Mg²⁺), Capacidade de troca de cátions(CTC) e Matéria orgânica (MO) nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera, BRS Pujante e BRS Pajeú, submetidos a duas lâminas de irrigação e com e sem silício.

FONTE DE VARIÇÃO	GL	QUADRADOS MÉDIOS								
		pH	CE	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	MO
Bloco	3	0,0434 ^{ns}	0,0077**	294,80 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,0010 ^{ns}	0,088 ^{ns}	0,1103**	0,00003 ^{ns}	0,009 ^{ns}
Lâmina (LM)	1	0,0560 ^{ns}	0,0667**	1027,76 ^{ns}	178,75 ^{ns}	0,0020 ^{ns}	0,100*	0,2945**	0,02083 ^{ns}	41,236 ^{ns}
Erro A	3	0,0073	0,0001	105,92	18,71	0,0010	0,009	0,0001	0,01768	16,747
Silício (SI)	1	0,0003 ^{ns}	0,0054 ^{ns}	2671,42**	0,49 ^{ns}	0,0035**	0,310**	0,0660 ^{ns}	0,05603 ^{ns}	30,800*
Genótipo (GE)	2	0,0426**	0,0104 ^{ns}	887,88**	167,83**	0,0031**	0,067 ^{ns}	0,0801*	0,35825**	24,060**
LM x SI	1	0,0280*	0,0111 ^{ns}	92,04 ^{ns}	8,72 ^{ns}	0,0028**	0,116 ^{ns}	0,1728*	0,01470 ^{ns}	2,275 ^{ns}
LM x GE	2	0,0066 ^{ns}	0,0171 ^{ns}	281,63 ^{ns}	13,62 ^{ns}	0,0022**	0,397**	0,0208 ^{ns}	0,21005**	4,402 ^{ns}
SI x GE	2	0,0166 ^{ns}	0,0271*	931,84**	23,13 ^{ns}	0,0048**	0,021 ^{ns}	0,0097 ^{ns}	0,08003 ^{ns}	39,650**
LM x SI x GE	2	0,0572**	0,0207 ^{ns}	135,70 ^{ns}	274,04**	0,0029**	0,026 ^{ns}	0,0663 ^{ns}	0,16207**	2,399 ^{ns}
Erro B	30	0,0052	0,0063	142,36	8,91	0,0002	0,033	0,0237	0,02415	4,325
CV (A) (%)	-	1,10	2,50	12,67	13,93	23,79	3,58	1,95	3,65	20,15
CV (B) (%)	-	0,93	16,80	14,69	9,62	11,63	6,63	22,88	4,26	10,24

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

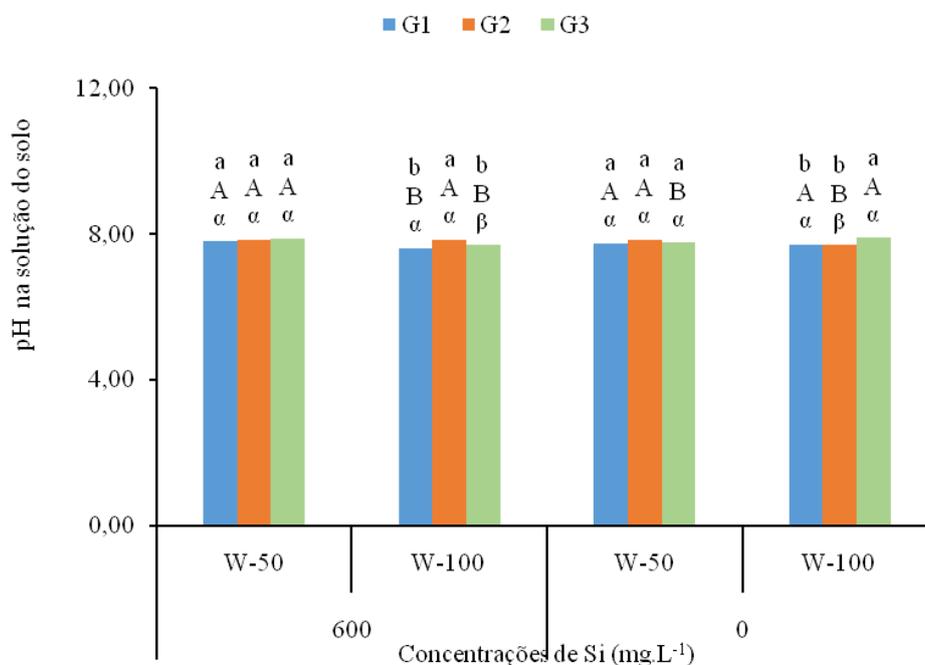
^{ns}= não significativo; ** significativo ao nível de 1% probabilidade; * significativo ao nível de 5% probabilidade; CV= Coeficiente de Variação (%).

O pH é a característica do solo que mais limita a produção das culturas, sua faixa considerada ideal para a maioria das culturas está entre 6,0 – 7,0 (MALAVOLTA, 1980; LUZ et al., 2002). As plantas absorvem os nutrientes da solução do solo, e essa solução depende do pH, que afeta a eficiência da absorção desses nutrientes pelas células das raízes da planta e, conseqüentemente, influencia na sua produtividade (MALAVOLTA, 1980; MARSCHNER, 1995). Vale salientar que à medida que o valor de pH decresce, a absorção relativa de cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4) diminui e a de ânions (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , MoO_4^-) aumenta, ocorrendo o inverso quando o pH da solução atinge valores superiores a 7,0 (LUZ et al., 2002). Dessa forma, os valores de pH encontram-se acima dos considerados adequados, variando entre 7,5 - 8,0, independentemente da fonte de variação, para a maioria das culturas, inclusive para o feijão-caupi. De acordo com os estudos de Mousa et al. (2022), o pH ideal para o crescimento do feijão-caupi deve estar entre os valores de 5,3 - 7,2, e que as plantas cultivadas no solo com o pH 5,3 exibiram maior crescimento em altura. Já para Olorunwa et al. (2022), o feijão-caupi cultivado em um solo com pH 6,47, obteve produtividade de 1319,4 kg/ha⁻¹ e 1784,0 kg/ha⁻¹. E nos trabalhos de Duddigan et al. (2021), o pH do solo influenciou a mobilidade de Ca, Al, Mn e P, que por sua vez teve impacto na produção de biomassa vegetal.

Comparativamente, o valor do pH antes da instalação do experimento estava em 6,40, e no final do experimento, o valor médio do pH foi de 7,77 com incremento de 21,40%. Este aumento pode estar relacionado à absorção dos cátions trocáveis: Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+ pelos genótipos de feijão-caupi ou a incorporação de sódio ao solo pela água de irrigação, haja vista, que na caracterização química da água, o teor de sódio é de 6,45 mmol/L, correspondendo que cada de litro de água incorporado ao solo pela irrigação, adicionou-se também 0,28 mg de sódio ao solo, justificando, o aumento do pH no final do experimento (Figura 13).

Existe ainda, uma correlação positiva entre os cátions permutáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+) e o pH, originando um resultado do H^+ durante o processo de acidificação do solo, em relação a função de competir com os cátions trocáveis por sítios de ligação, sendo mais acentuado por íons Al^{+3} , que são mais solúveis em condições de acidez do solo, e dessa forma, disputam ainda mais por sítios de ligação com os cátions permutáveis (LUCAS et al. 2011), que conseqüentemente, proporcionam a perda por lixiviação de Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+ .

Figura 13. Potencial hidrogeniônico na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao desdobrar silício em genótipos e genótipos em silício, observou-se que não houve efeito significativo do desdobramento de genótipos com aplicação de silício, mas, houve diferença estatística em aplicação de silício entre os genótipos BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) pelo teste Tukey ($P < 0,05$). Já para desdobramento de silício em genótipos, houve diferença entre aplicação de silício e sem o uso insumo no genótipo BRS Pajeú (G3) pelo teste F ($P < 0,05$) para os valores de condutividade elétrica do solo (CE). Os maiores valores médios de condutividade elétrica (CE) foram para o genótipo BRS Novaera (G1) com aplicação via foliar de silício e o genótipo BRS Pujante (G2) sem uso de silício com valor de $0,52 \text{ dS m}^{-1}$. Em contraparte, como menor valor da CE do solo, destacou-se o BRS Pajeú (G3) sem aplicação de silício com $0,40 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 14A).

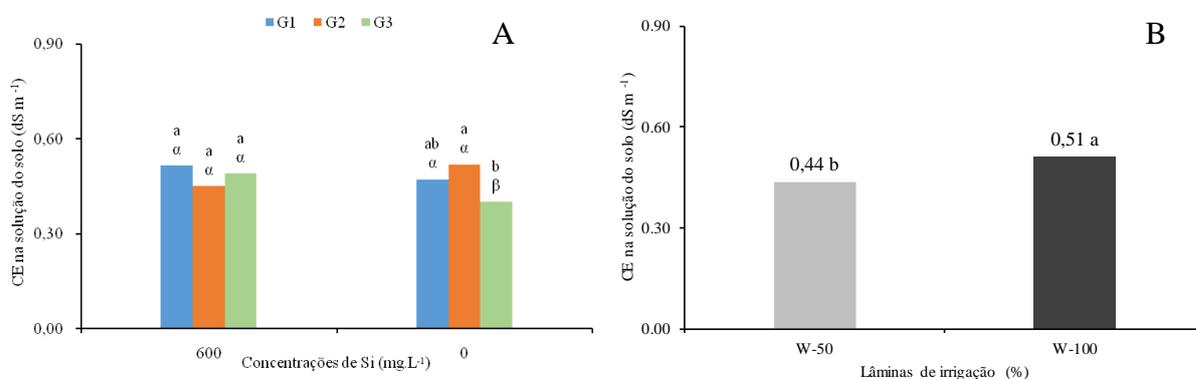
Diante dessas informações, o aumento da condutividade elétrica da água de irrigação acarretou uma marcante influência negativa na massa seca da raiz nos estudos de Barbosa et al. (2021). Além disso, Sá et al. (2021), confirmaram em sua pesquisa que a irrigação com água com condutividade elétrica superior a $2,5 \text{ dS m}^{-1}$, proporciona em altas taxas a salinidade do solo e a concentração de sódio nos tecidos para níveis tóxicos, reduzindo a acumulação de fitomassa e as concentrações de macronutrientes no tecido vegetal de feijão-caupi. No

entanto, na presente pesquisa não houve problemas de concentrações de sódio no tecido vegetal.

Ao comparar, os valores da condutividade elétrica do solo, irrigado com 100% e 50% da evapotranspiração da cultura, observa-se uma superioridade de 15,90% com valores médios de $0,51 \text{ dS m}^{-1}$ e $0,44 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente (Figura 14B). Esta superioridade está correlacionada com maior volume de água aplicado no solo, com água da condutividade elétrica - $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ e concentrações de Na^+ de $6,45 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, indicando maior adição de sódio ao solo através da irrigação.

Posto isso, a estimativa da salinidade presente no solo decorre da condutividade elétrica do próprio solo e da concentração de sais presentes na solução. De acordo com Minami e Salvador (2010), são considerados valores de CE superiores a $3,4 \text{ dS m}^{-1}$ muito alta, valores de $2,25 \text{ dS m}^{-1}$ a $3,39 \text{ dS m}^{-1}$ são altos, valores entre $1,8 \text{ dS m}^{-1}$ e $2,24 \text{ dS m}^{-1}$ são ligeiramente altos, valores de $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ a $1,79 \text{ dS m}^{-1}$ são moderados, os valores entre $0,15 \text{ dS m}^{-1}$ e $0,49 \text{ dS m}^{-1}$ são baixos e os valores abaixo de $0,14 \text{ dS m}^{-1}$ são considerados muito baixos. Neste sentido, o valor da condutividade elétrica do solo estava moderado, indicando não haver problemas de salinidade na área experimental, pois foi necessário um cuidado com a água de irrigação.

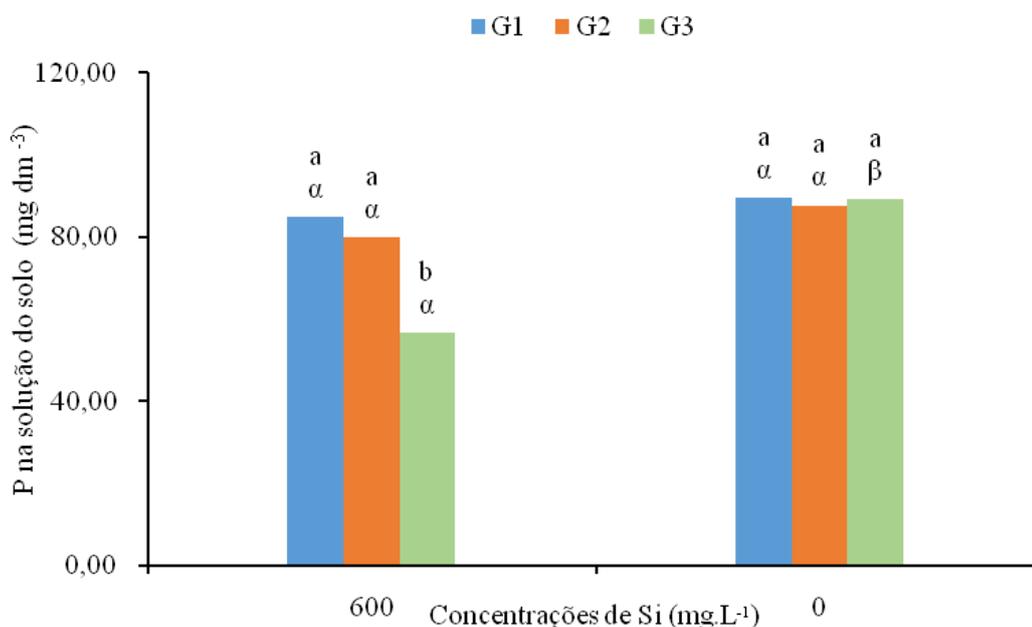
Figura 14. Condutividade elétrica na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) (A) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F (B).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A interação silício x genótipos mostrou-se significativa para as concentrações de fósforo (P) disponíveis no solo. Para o desdobramento de genótipos dentro de cada aplicação de silício, o BRS Novaera (G1) e o BRS Pujante (G2) não diferiram entre si, apresentando-se maiores que o BRS Pajeú (G3), quando adubados com silício. Porém, para os genótipos sem aplicação de silício, não houve diferença estatística pelo teste Tukey (0,05) das concentrações de fósforo no solo. Para o desdobramento de silício dentro de cada genótipo, verificou-se que não houve efeito significativo com e sem aplicação de silício para os genótipos BRS Novaera (G1) e o genótipo BRS Pujante (G2), porém, houve diferença estatística no genótipo BRS Pajeú (G3), mas, sempre com superioridade nas concentrações de fósforo sem aplicação em comparação com aplicação de silício (Figura 15).

Figura 15. Fósforo na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesmas letras gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A superioridade está relacionada aos maiores valores de fósforo no limbo foliar dos genótipos de feijão-caupi que receberam aplicação de silício em comparação àqueles que não receberam. Assim, uma maior absorção de fósforo da solução do solo implicou em menores concentrações de fósforo disponíveis no solo, devido ao maior crescimento dos genótipos, proporcionando uma maior absorção de P pelas plantas, sendo esse o terceiro elemento mais

exportado pela a cultura do feijão-caupi. Independentemente do tratamento estudado, os nutrientes exportados pela cultura do feijão obedecem à seguinte ordem $N > K > P > Mg > Ca > S > Fe > Zn > Mn > Cu$ (PEREZ et al., 2013).

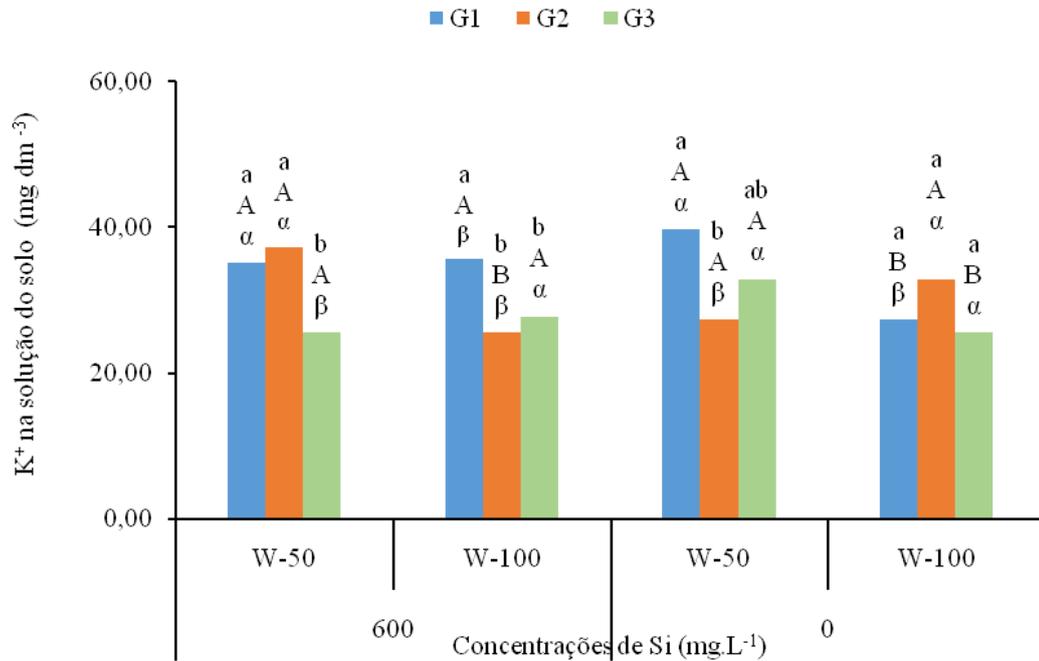
Comisso, na pesquisa as concentrações de P disponíveis no solo estão muito acima dos teores considerados adequados, pois a capacidade de adsorção de P é diminuída com o aumento da concentração do P em função da capacidade da fertilidade do solo (WHALEN & CHANG, 2002), e da capacidade de adsorção dos coloides do solo em diminuir os ácidos orgânicos liberados pela presença da matéria orgânica no pomar (FRANCHINI et al., 2001). Outro fator considerado é a liberação de nutrientes dos materiais orgânicos durante o processo de mineralização, que depende das características da espécie trabalhada, e especialmente da relação C/N; bem como, da localização e da forma em que esses nutrientes se encontram no tecido vegetal (GIACOMINI et al., 2003).

As maiores e menores concentrações de fósforo disponíveis no solo foram, respectivamente, 89,33 mg dm⁻¹ referente ao genótipo BRS Novaera (G1) e sem aplicação de silício e 56,59 mg dm⁻¹, correspondente ao genótipo BRS Pajeú (G3) com aplicação via foliar de silício. Nesse sentido, observa-se que as concentrações de P disponíveis estavam adequadas. De acordo com Ribeiro et al. (1999), ótimo teores são considerados acima de 45 mg dm⁻¹ para solos com percentagem de argila 0 – 15% e Sobral et al. (2015) classifica teores acima de 20 mg dm⁻¹ para solos de textura arenosa.

A interação lâmina x silício x genótipos de feijão-caupi foi significativa para as concentrações de potássio (K⁺) trocável no solo. Os maiores valores de potássio foram de 30,73 mg dm⁻¹; 35,10 mg dm⁻¹; 30,73 mg dm⁻¹ e 32,91 mg dm⁻¹, referentes aos tratamentos genótipo BRS Novaera (G1) e genótipo BRS Pujante (G2) com silício e 50% evapotranspiração da cultura (ETc), genótipo BRS Pujante (G2) sem silício e 50% da ETc e genótipo BRS Pujante (G2) sem silício e 100% da ETc, respetivamente. No entanto, a menor concentração de potássio trocável no solo foi de 25,59 mg dm⁻¹, correspondente ao genótipo BRS Pajeú (G3) com aplicação de silício e 50% ETc e sem aplicação de silício e 100% ETc (Figura 16).

O potássio é um nutriente essencial que desempenha uma importante função na fisiologia das plantas e na dinâmica solo-planta no que diz respeito aos nutrientes. Portanto, é imprescindível algumas recomendações criteriosas de K⁺ para o equilíbrio entre os nutrientes catiônicos e micronutrientes, especialmente em solos arenosos (VOLF et al., 2022), pois esse elemento pode contribuir no melhoramento da estabilidade estrutural do solo.

Figura 16. Potássio na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



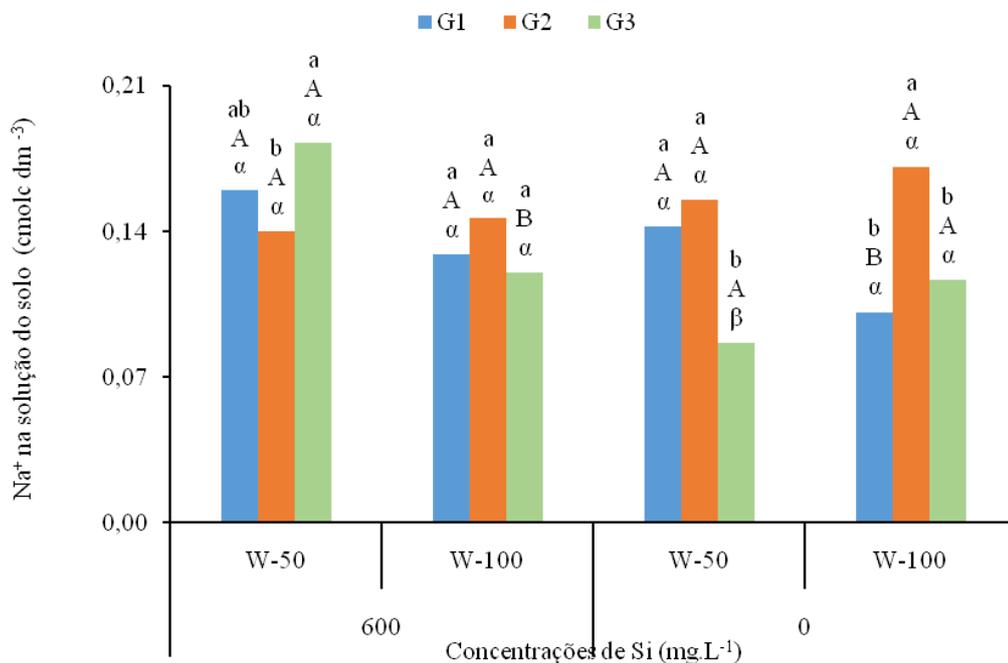
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Sabendo disso, Oliveira et al. (2019) concluíram que o déficit hídrico afeta diferentemente o conteúdo em macronutrientes do feijão-caupi, demonstrando diminuição de K, Ca e Mg. Porém, ao comparar as concentrações de K⁺ no solo de 46mg dm⁻³, observa-se uma redução de potássio ao final do experimento, independentemente da fonte de variação, sendo justificável, pois o K⁺ é o segundo elemento mais exportado pelos grãos de feijão-caupi. Ainda, em sua pesquisa, Magalhães et al. (2017) observaram uma ordem decrescente de kg ha⁻¹, referente a uma produtividade de 16,3 t ha⁻¹, destacando-se N (49,7) > K (18,7) > P (6,2) > Mg (4,3) > Ca (4,2) > S (2,9). Dessa forma, o valor total de nutrientes exportado pelo feijão-caupi, em relação à produtividade e a concentração de nutrientes nos grãos, depende de diversos fatores, como a fertilidade do solo, tipo de cultura, sistema de cultivo e a população de plantas (PEREZ et al., 2013).

Apesar da absorção e da exportação de K⁺ pelos genótipos de feijão-caupi, as concentrações médias de potássio trocável estavam médias no final do experimento, conforme recomendação de Ribeiro et al. (1999) e Sobral et al. (2015), cujo valor entre 41 – 70 mg dm⁻¹ e 30 – 60 mg dm⁻¹ é considerado médio, respectivamente.

As concentrações de sódio trocável variaram, respectivamente, de 0,18 g kg⁻¹ a 0,09 g kg⁻¹, referentes aos tratamentos genótipo BRS Pajeú, irrigado com 50% de evapotranspiração da cultura (ETc), com aplicação de silício e sem aplicação (Figura 17). A concentração disponível de Na⁺ do solo não pode ser analisado isoladamente para avaliar os efeitos adversos sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo importante conhecer também a proporção em relação aos demais cátions trocáveis do solo, como K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺. Em seus estudos, Sá et al. (2019) observaram redução no acúmulo de fitomassa e a composição mineral das plantas de feijão-caupi, irrigado com água salina a partir de 0,8 dS m⁻¹, tornando as plantas consideradas moderadamente tolerantes até a condutividade elétrica (CE) de 2,5 dS m⁻¹. Vale salientar que, na presente pesquisa, os genótipos de feijão-caupi foram irrigados com CE 1,01 dS m⁻¹ e não apresentaram toxicidade.

Figura 17. Sódio na solução do solo nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



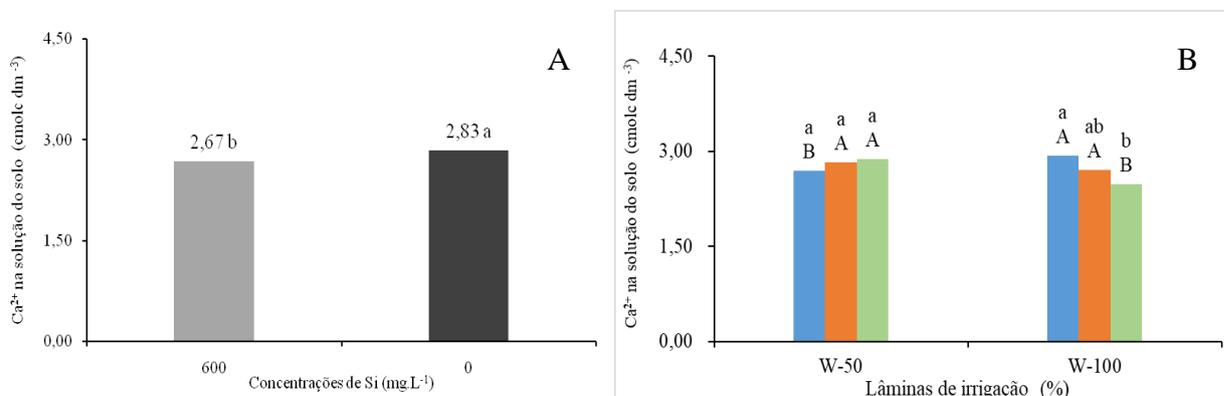
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O índice médio de saturação de sódio (ISNa) foi de 3,8%, indicando que o experimento não tinha problemas de sodicidade. Com isso, é relevante apontar que um solo é considerado sódico quando apresenta ISNa superior a 15% (RICHARDS, 1970).

O índice de saturação de Na^+ na capacidade de troca de cátion ($\text{CTC}_{\text{total}}$) da maioria dos solos é baixo quando comparado à saturação dos demais cátions, como o K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , influenciando muito pouco nos cálculos da soma de base (SB) e da $\text{CTC}_{\text{total}}$ dos solos. Por essa razão, em muitos casos, o Na^+ é desconsiderado nesses cálculos, exceto em regiões de clima semiárido devido aos fatores pedogenéticos de formação dos solos que favorecem ao acúmulo de sódio trocável nos solos.

Ao desdobrar lâminas em genótipos e genótipos em lâminas, observa-se que não houve efeito significativo do desdobramento de genótipos com 50% de evaporação de referência (ETc), mas, houve diferença estatística com a lâmina de 100% ETc entre os genótipos BRS Novaera (G1) e BRS Pajeú (G3) pelo teste Tukey ($P < 0,05$) para concentração de cálcio trocável no solo (Figura 18A). Para desdobramento de lâminas em genótipos, houve diferença significativa das lâminas (50% e 100% - ETc) entre os genótipos de feijão-caupi BRS Pajeú (G3) pelo teste F ($P < 0,05$) para os valores de cálcio trocável. As maiores e menores concentrações de Ca^{+2} trocável foram nos tratamentos BRS Novaera (G1) e BRS Pajeú (G3) com concentrações de $2,93 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $2,49 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, no tecido vegetal (Figura 18B), indicando que há diferença de absorção e exportação de Ca^{+2} entre os genótipos. Essas concentrações estão acima do nível considerado adequado para o feijão-caupi, que é de $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (FREIRE FILHO et al., 2005).

Figura 18. Cálcio na solução do solo nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F (A). Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F (B).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O cálcio é constituinte da parede celular (MARSCHNER, 1995), assim, para maior crescimento e produção de genótipos de feijão-caupi são necessárias um aumento nas quantidades de Ca^{+2} trocável para maior disponibilidade e a absorção. A porção acumulada na massa seca da parte aérea segue a seguinte ordem $\text{N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{P} > \text{Mg} > \text{S}$ com o cúmulo de 96 kg ha^{-1} , 92 kg ha^{-1} , 37 kg ha^{-1} , 17 kg ha^{-1} , 14 kg ha^{-1} , 10 kg ha^{-1} , respectivamente (VERA et al., 2019), estando assim, o cálcio (Ca) como terceiro macronutriente mais acumulado pela cultura de feijão-caupi. Além disso, o fornecimento de Ca^{2+} e Mg^{2+} possibilita a dispersão das raízes, favorecendo de forma positiva no crescimento das plantas (NATALE et al., 2007).

Diante dessas informações e no que diz respeito à pesquisa, as concentrações médias de cálcio trocável demonstraram-se boas e médias no final do experimento, apesar da absorção e da exportação de Ca^{+} pelos genótipos de feijão-caupi, de acordo com a recomendação de Ribeiro et al. (1999) e Sobral et al. (2015), cujo valor estavam entre $2,41 - 4,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $1,6 - 3,0 \text{ mg dm}^{-1} \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente.

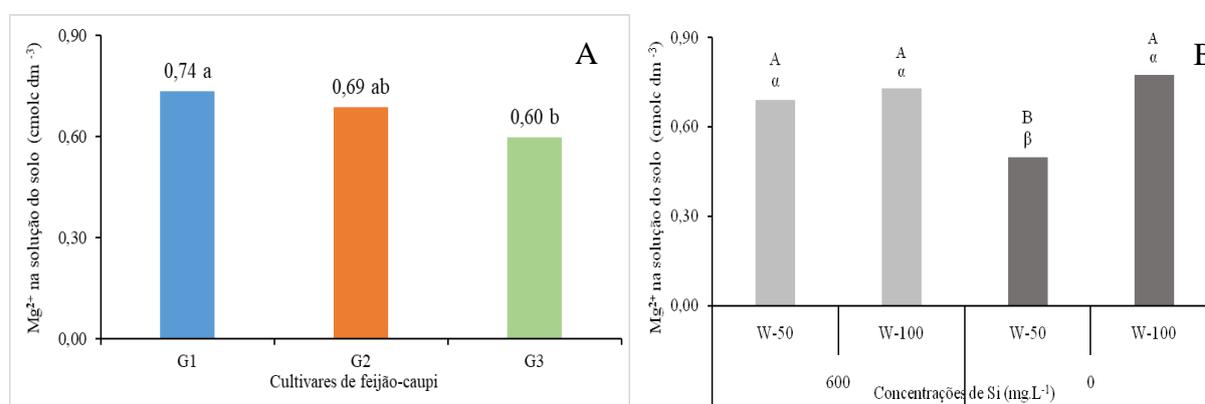
Ao comparar as concentrações trocáveis de magnésio no solo, observou-se efeito significativo entre os genótipos BRS Novaera (G1) e BRS Pajeú (G3) ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey sobre as concentrações de Mg^{+2} trocável no solo com superioridade 23,33%, cujos valores foram de $0,74 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $0,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente (Figura 19A). Ao desdobrar a interação lâminas e silício, os tratamentos com silício tanto nas lâminas de 50% quanto de 100% de evapotranspiração da cultura (ETc) e aqueles sem aplicação de silício com 100% - ETc foram semelhantes, porém diferiram do tratamento sem silício com 50% Etc (Figura 19B). As maiores e menores concentrações de Mg^{+2} trocáveis foram de $0,78 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $0,50 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, referentes aos tratamentos sem silício com 50% e 100% ETc, respectivamente.

Outro fator importante, é a relação Ca/Mg, considerada ideal para a relação de 3 a 5:1, de forma que a planta aproveite ao máximo ambos os nutrientes sem que um interfira no uso do outro. Com isso, a relação média no solo foi 4/1, o que nesse caso é ideal, proporcionando equilíbrio na absorção de Ca^{+2} e Mg^{+2} pelos os genótipos de feijão-caupi. Quanto a fertilidade do solo, há em torno dessa inter-relação entre os nutrientes Ca e Mg pontos importantes que é válido ressaltar, como o raio iônico, valência, grau de hidratação e mobilidade, ditas como propriedades químicas que são semelhantes entre eles, que possibilita uma competição pelos sítios de adsorção no solo e absorção nas raízes (GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2013).

As concentrações médias de Mg^{+2} trocável no solo no início e no final do experimento foram $0,72 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $0,67 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente. Portanto, na camada de 0–20 cm, o magnésio permaneceu com a mesma absorção e exportação pelos genótipos de feijão-caupi.

Sendo assim, mesmo com absorção e a exportação de Mg^{+2} pelos genótipos de feijão-caupi, as concentrações médias de cálcio trocável estavam médias no final do experimento, conforme recomendação de Ribeiro et al. (1999) e Sobral et al. (2015), cujo valor é entre $0,46 - 0,90 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $0,4 - 1,0 \text{ mg dm}^{-1} \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente.

Figura 19. Magnésio na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) (A) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) (B) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



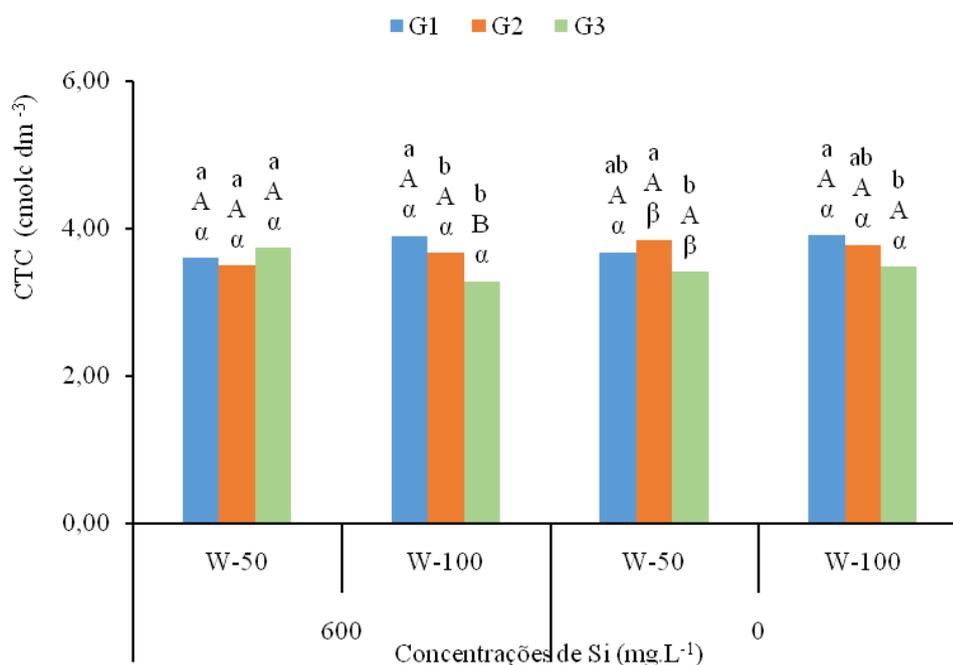
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A capacidade de troca de cátions total (CTC pH 7,0) variou de $3,49 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $3,98 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, referentes aos seguintes tratamentos, genótipo BRS Pujante (G2) com silício e 50% evapotranspiração da cultura (ETc) e BRS Novaera (G1) sem silício e 100% ETc (Figura 20). Em síntese, há uma baixa variabilidade da CTC total do solo, indicando, diferenciação nutricional entre os genótipos de feijão-caupi. Em geral, os genótipos de feijão-caupi, o silício e o manejo da irrigação associados aos restos culturais sobre solo induziram alterações nas propriedades químicas do Neossolo Flúvico através da alteração no valor do pH, da capacidade de troca catiônica e das quantidades de cátions permutáveis, fato confirmado por Ramos et al. (2018) quando observaram o incremento da CTC na ordem de 25% a cada $1,8 \text{ kg m}^{-2}$ de carbono orgânico armazenado em plantio direto.

Portanto, os solos com relevantes qualidades de fertilidade geralmente apresentam as seguintes proporções de nutrientes na CTC: $K^+ = 3\%$ a 5% ; $Ca^{2+} = 50\%$ a 70% ; $Mg^{2+} = 10\%$ a 15% ; $Na^+ = < 5\%$. Com base nisso, em relação à distribuição das bases da CTC (Capacidade de Troca Catiônica do solo), a média total, independente da fonte de variação, são os valores

de 2,19% de K^+ , 75,56% de Ca^{2+} , 18,48% de Mg^{2+} , 3,77% de Na^+ e 0% de $H + Al$ (PREZOTTI; GUARÇONI, 2013).

Figura 20. Capacidade de troca de cátions na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



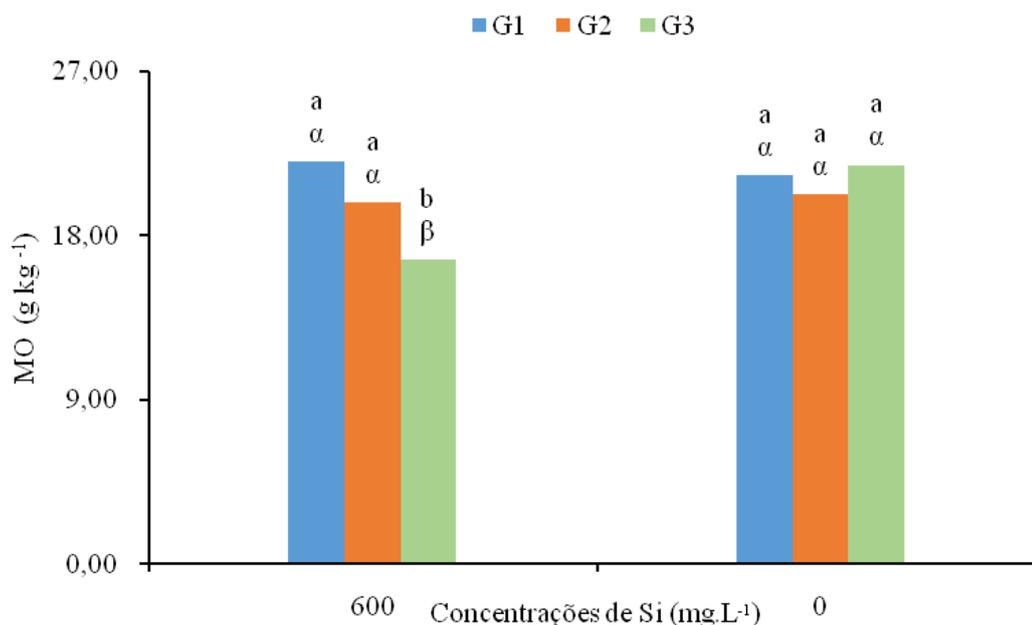
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na pesquisa, no entanto, a saturação de Ca^{2+} Mg^{2+} estavam acima do nível, o K^+ estava abaixo e Na^+ dentro do intervalo adequado. Ao comparar, os valores da CTC_{total} com os valores de Ribeiro et al. (1999) e Sobral et al. (2015), os valores são considerados baixos, entre $1,61 \text{ cmolc dm}^{-3}$ – $4,30 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e inferior 5 cmolc dm^{-3} , respectivamente.

Ao desdobrar a interação silício x genótipos de feijão-caupi observou-se que os genótipos BRS Novaera (G1) e BRS Pujante (G2) são iguais, mas, diferiram do BRS Pajeú (G3) quanto genótipos em silício. Para os genótipos sem aplicação de silício não houve efeito significativo pelo teste Tukey ($P < 0,05$) sobre os teores de matéria orgânica do solo. Em contraparte, ao desdobrar silício em genótipos só houve efeito para BRS Pajeú (G3) (Figura 21). As maiores e menores concentrações de matéria orgânica do solo (MOS) foram $22,05 \text{ g kg}^{-1}$ e $16,68 \text{ g kg}^{-1}$ referentes aos tratamentos BRS Novaera (G1) e BRS Pujante (G3) com aplicação via foliar de silício, respectivamente. Comparativamente, as concentrações médias

estavam na faixa de $20,1 \text{ g kg}^{-1}$ – $40,0 \text{ g kg}^{-1}$ e $1,5 \text{ g kg}^{-1}$ a $3,0 \text{ g kg}^{-1}$, conforme critério de Ribeiro et al. (1999) e Sobral et al. (2015), respectivamente.

Figura 21. Matéria orgânica na solução do solo, nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Fajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao comparar, a concentração de MOS antes da instalação do experimento de 12 g kg^{-1} com as concentrações no final do experimento, constatou-se um incremento de 83,33% e 39%, respectivamente. Possivelmente, a manutenção dos restos culturais no solo contribuíram para o aumento da MOS, fato reportado por Boulton et al. (2005) ao constatarem aumento nas concentrações dos nutrientes essenciais para as plantas e do valor da matéria orgânica do solo com adição de matéria orgânica ao solo (10 t/ha esterco bovino). Em contrapartida, Ramos et al. (2018) verificaram que a eliminação da matéria orgânica do solo reduziu a CTC de um valor já considerado baixo no valor de $8,40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para $4,82 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, evidenciando a importância da matéria orgânica para o solo. Ainda, Silva e Cook (2003) verificaram que a incorporação de matéria orgânica em solos de baixa fertilidade proporciona o aumento de rendimento no feijão-caupi. Esses resultados sugerem que a manutenção da matéria orgânica sobre o solo interfere nos atributos químicos do solo, que podem evoluir a produtividade das culturas, inclusive do feijão-caupi.

4.2 Macronutrientes e sódio nas folhas

Verifica-se que o teste F para a interação silício x genótipos de feijão-caupi (Si x Ge) foi significativa ($P < 0,05$) sobre a concentração de sódio (Na^+) nas folhas. Também, a interação lâminas x genótipos de feijão-caupi foi significativa ($P < 0,05$) na concentração de fósforo (P) nas folhas, indicando existir uma dependência entre os efeitos dos fatores. Ainda, observa-se efeito significativo dos fatores isolados, lâminas e silício para as concentrações de potássio (K^+) e Cálcio (Ca^{+2}) (Tabela 9).

Tabela 9. Resumo da análise de variância para as variáveis Sódio (Na), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Fósforo (P) nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera, BRS Pujante e BRS Pajeú, submetidos a duas lâminas de irrigação e com e sem silício.

FONTE DE VARIÇÃO	GL	QUADRADOS MÉDIOS			
		P	K	Ca	Na
Bloco	3	0,078 ^{ns}	47,91 ^{ns}	23,47 ^{ns}	0,048 ^{ns}
Lâmina (LM)	1	17,62**	484,75*	291,60*	0,88*
Erro A	3	0,11	47,55	15,63	0,030
Silício (SI)	1	10,59**	24,39 ^{ns}	65,26*	0,17**
Genótipo (GE)	2	3,14**	15,28 ^{ns}	22,004 ^{ns}	0,10**
LM x SI	1	0,34 ^{ns}	78,23 ^{ns}	23,78 ^{ns}	0,039 ^{ns}
LM x GE	2	2,47**	64,44 ^{ns}	5,91 ^{ns}	0,053 ^{ns}
SI x GE	2	0,60 ^{ns}	6,08 ^{ns}	1,75 ^{ns}	0,087*
LM x SI x GE	2	0,25 ^{ns}	14,96 ^{ns}	1,51 ^{ns}	0,037 ^{ns}
Erro B	30	0,23	47,31	12,91	0,048 ^{ns}
CV (A) (%)	-	11,49	32,61	26,13	0,88*
CV (B) (%)	-	16,57	32,53	23,75	0,030

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

^{ns}= não significativo; ** significativo ao nível de 1% probabilidade; * significativo ao nível de 5% probabilidade; CV= Coeficiente de Variação (%).

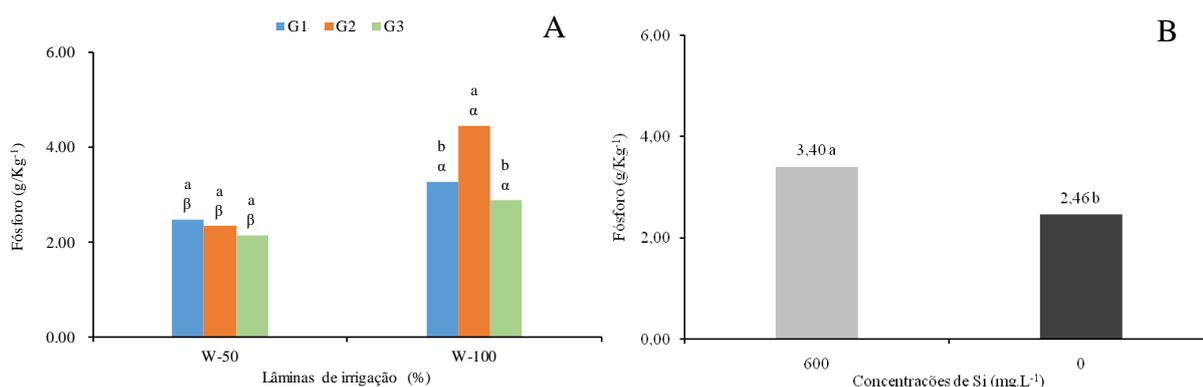
Ao estudar o desdobramento de silício em lâmina e lâmina em silício, observa-se que os genótipos na lâmina de 100% da evapotranspiração da cultura — ETC, houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey da concentração de fósforo (P) em folhas de genótipo BRS Pujante, em relação aos genótipos BRS Novaera e BRS Pajeú, que não deferiram entre si. Para o desdobramento da lâmina de 50% ETC, houve efeito

significativo pelo teste F ($P < 0,01$) nas concentrações foliares de P nos genótipos (Figura 22A).

Comparativamente, as concentrações de fósforo em folhas de genótipos de feijão-caupi foram superiores quando irrigados com a lâmina de 100% ETc em comparação com os mesmos genótipos irrigados com a lâmina de 50% ETc, proporcionando dessa maneira a redução da absorção de fósforo pelos genótipos. As maiores concentrações de fósforo foram para os genótipos BRS Pujante e BRS Novaera, quando irrigados com 100% ETc e 50% ETc, respectivamente, indicando que, o BRS Novaera foi mais eficiente na absorção de fósforo sob condições abióticas de déficit hídrico. Essa superioridade da lâmina de 100% pode estar relacionada à mobilidade do fósforo, no que se refere a sua capacidade de ser inerte e dependente da disponibilidade de água no solo (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Os genótipos que receberam adubação foliar com silício apresentaram maiores concentrações de fósforo em comparação aos mesmos genótipos que não foram adubados com silício, cujos valores foram de $3,40 \text{ g kg}^{-1}$ e $2,46 \text{ g kg}^{-1}$ com uma superioridade de 38,21%, respectivamente (Figura 22B).

Figura 22. Concentração de fósforo em folhas nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

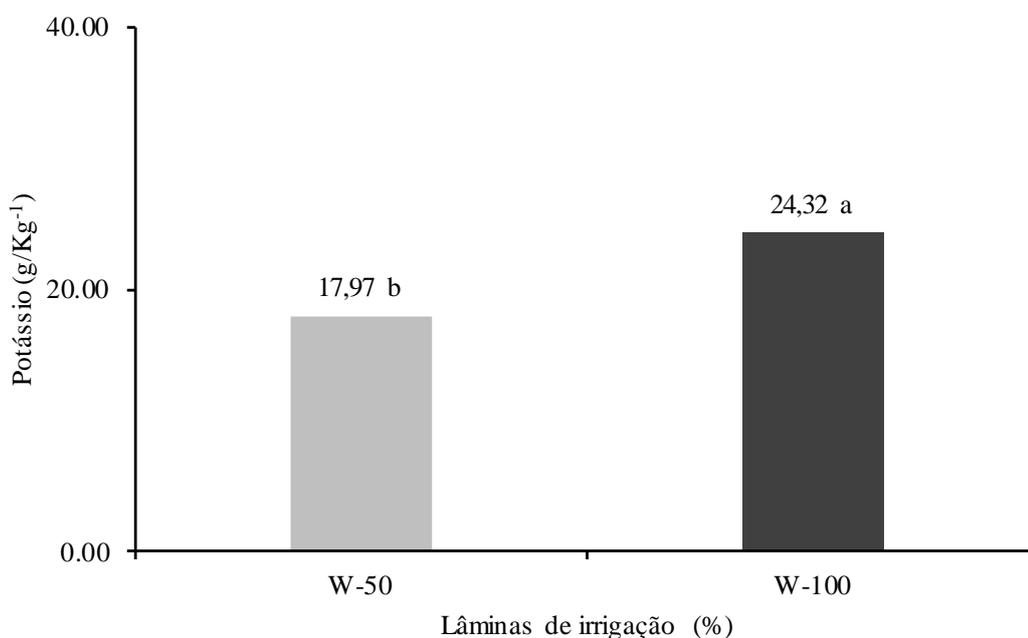
A disponibilidade do fósforo (P) no solo é notavelmente baixa, devido à sua pouca solubilidade, forte absorção e lenta difusão na maioria dos solos. Já o silício (Si) mostra-se capaz de amenizar múltiplas tensões bióticas e abióticas. Em algumas pesquisas, verificou-se o aumento da disponibilidade de P no solo perante uma alta concentração de Si, sendo explícita pela competição entre esses dois elementos e pela ligação na superfície dos minerais

do solo, ocasionando na mobilidade do fósforo (NEU et al., 2017). Esse fato foi confirmado por Mali e Aeri (2008), na qual adições inferiores de Si ($50 - 100 \mu\text{g/g}^{-1}$) aumentaram significativamente o crescimento de nódulos (número de nódulos, peso fresco e peso seco), rendimento relativo de raiz e rebento, fósforo e concentrações de cálcio em feijão-caupi.

Conforme Malavolta et al. (1997) os níveis adequados de concentração de P em 5 g/kg^{-1} são considerados baixos. Já para Fageria et al. (1996), os limites em torno de $2,5 - 5 \text{ g/kg}^{-1}$ são considerados ideais. Nessa perspectiva, a insuficiência de fósforo nas cultivares acarreta diversas respostas morfológicas e fisiológicas, porém na pesquisa não se observou o aparecimento de sintomas visuais de deficiência do nutriente.

As concentrações de potássio na folha em genótipos de feijão-caupi foram superiores nos genótipos irrigados sem déficit hídrico ($100\% - \text{ETc}$) em comparação aos mesmos tratamentos sob déficit de água no solo ($50\% - \text{ETc}$), cujas concentrações foram de $24,32 \text{ g kg}^{-1}$ e $17,97 \text{ g kg}^{-1}$, equivalente a uma superioridade de $35,33\%$, respectivamente (Figura 23).

Figura 23. Concentrações de potássio em folhas nas cultivares de feijão-caupi submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma não diferem entre si pelo teste F.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A superioridade está relacionada à alta temperatura do ar (33°C), que possivelmente, ocasiona o fechamento dos estômatos nos horários de maior insolação e proporciona menor

crescimento da massa seca de raiz, refletindo dessa forma em menor concentração de potássio (K^+) nas raízes, mesmo que esse elemento seja um macronutriente responsável pelo aumento do crescimento de raízes nas plantas. As concentrações de K estavam abaixo do mínimo considerado ideal por Malavolta et al. (1997) de 57 g kg^{-1} e ideais pelas faixas propostas por Fageria et al. (1996) de $16,54 \text{ g kg}^{-1}$. Ainda, as concentrações estavam inferiores às constatações de Parry et al. (2008) com valor médio de $29,62 \text{ g kg}^{-1}$ em feijão-caupi, porém, foram superiores aos de Zyada et al. (2021) com concentração de K^+ de 16 g kg^{-1} em folhas de feijão-caupi.

Para estudar o comportamento dos genótipos de feijão-caupi dentro de cada nível de silício, observou-se que não houve efeito significativo ($p < 0,05$) pelo teste Tukey no grau de 600 mg/L^{-1} de Si para concentrações de Na^+ foliar em genótipos de feijão-caupi. Porém, sem aplicação de silício, as concentrações de Na^+ foliar nos genótipos BRS Novaera e BRS Pujante foram semelhantes, diferindo do BRS Pajeú (Figura 24A). Para a análise do desdobramento de silício dentro de cada genótipo, não houve efeito significativo para as concentrações de Na^+ nos genótipos BRS Novaera e BRS Pujante, diferindo do BRS Pajeú. As menores concentrações de sódio (Na^+) em folhas de genótipos de feijão-caupi foram obtidas com aplicação foliar de ácido silícico em comparação aos mesmos tratamentos sem aplicação da adubação alternativa com silício, demonstrando a eficiência do silício de minimizar os efeitos abióticos. As maiores e menores concentrações de sódio foram nos genótipos BRS Novaera e BRS Pajeú com aplicação foliar de silício; já sem aplicação de silício foram BRS Novaera e BRS Pujante, respectivamente, mas, não houve toxicidade nos genótipos de feijão-caupi.

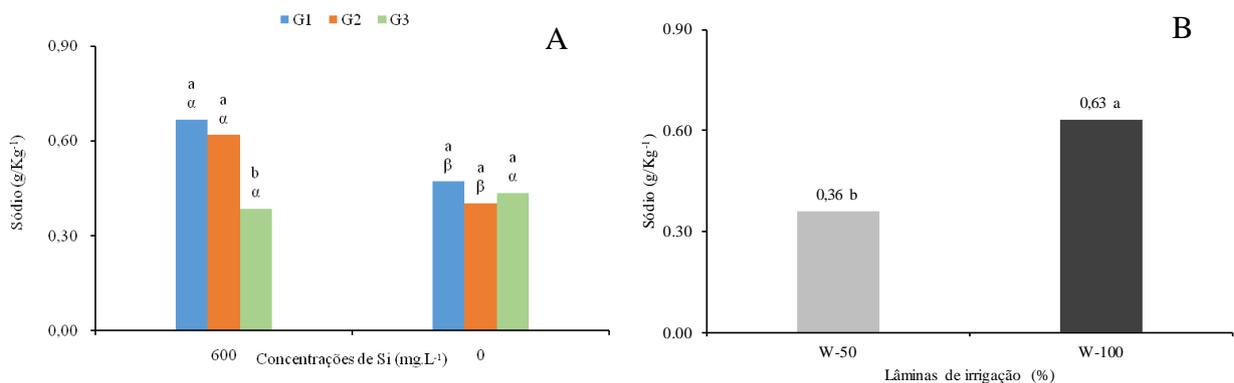
O sódio estava presente na capacidade de troca de cátions (CTC), assim, as plantas absorveram em quantidades que não causaram toxicidade, causado pelo excesso de sais. Mesmo que o déficit salino ocorra de modo variável em cultivares de feijão-caupi, quando submetidas a esse acontecimento demonstram perdas consideráveis em sua produção (LOIOLA et al., 2022). Ainda há relatos em algumas literaturas que o silício é um mecanismo que possui função de amenizar os efeitos deletérios dos sais nas plantas, aliviando dessa maneira o estresse, no entanto, essas informações ainda não são claras quanto a sua influência, seu transporte e divisão do sódio (Na) nos tecidos, células e organelas (BOSNIC et al., 2018).

Ao comparar, as concentrações de Na^+ nas folhas de feijão-caupi nas lâminas de 100% e 50% da evapotranspiração da cultura (ETc), observa-se uma superioridade de 75% na lâmina de 100% em comparação a lâmina de evapotranspiração da cultura de 50%, cujos valores foram de $0,63 \text{ g kg}^{-1}$ e $0,36 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente (Figura 24B). A superioridade

pode estar relacionada à maior expansão das raízes nas plantas cultivadas sem déficit hídrico, aumentando área de contato no complexo de troca catiônica do solo. Também, pode estar relacionada com o maior volume de água aplicada, haja vista que a concentração de sódio na água de irrigação é de $6,45 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, o que significa que cada litro de água adicionada no solo corresponde a $0,28 \text{ mg L}^{-1}$ de sódio, justificando, a maior concentração de sódio na lâmina de 100% ETc.

Em seus estudos, Jayawardhane et al. (2022) concluíram que as cultivares de feijão-caupi respondem à fatores do déficit abiótico de maneira divergente, dependendo do tipo, do nível de estresse e do órgão vegetal que está sendo submetido, indicando dessa maneira uma elevada plasticidade das plantas e sua adaptação ao ambiente.

Figura 24. Concentração de sódio em folhas nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022.



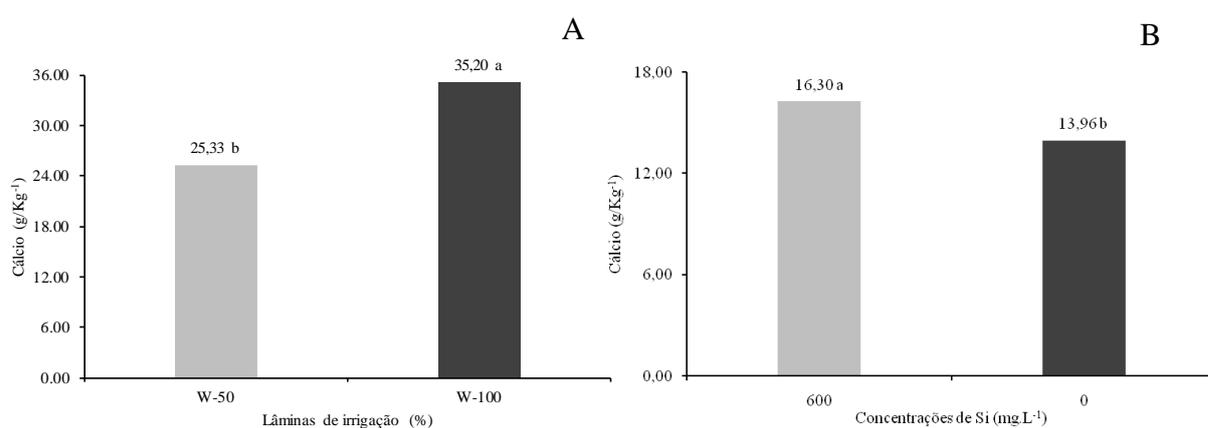
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Maiores concentrações de Cálcio (Ca^{+2}) foliar foram observadas nos genótipos irrigados sem déficit hídrico (100% - ETc) em comparação aos mesmos genótipos irrigados com déficit hídrico (50% - ETc), cujas concentrações foram de $35,20 \text{ g kg}^{-1}$ e $25,33 \text{ g kg}^{-1}$, equivalente a uma superioridade de 39,13% (Figura 25A). A superioridade está relacionada aos fatores abióticos da temperatura do ar e do solo e umidade do solo em volume, que demonstrou um aumento em média de 70°C , 130°C e 6% entre a lâminas de 100% - ETc e 50% - ETc, respectivamente. Assim, as plantas, por sua vez, realizam a absorção do nutriente em solução do solo pelas raízes, metabolizando-o e tornando-o disponível em suas folhas e nas partes vegetativas e reprodutivas. Em contraparte, a lâmina de 50% reduziu o crescimento das raízes, diminuindo a área de absorção de Ca^{+2} na capacidade catiônica do solo, afetando a

concentração desse elemento em genótipos de feijão-caupi, fato confirmado por Santiago et al. (2018) que analisou uma perda no volume da raiz em feijão-caupi BR17 Gurguéia na ordem 14 cm³ entre o tratamento com deficiência de cálcio e o tratamento controle.

Os genótipos de feijão-caupi apresentaram maiores concentrações foliares de Ca⁺², quando receberam adubação foliar com silício (200mg/L⁻¹) em comparação aos mesmos genótipos sem aplicação foliar de silício, cujos valores foram de 35,59 g kg⁻¹ e 27,93 g kg⁻¹, correspondendo a uma superioridade de 27,43% (Figura 25B). Com isso, demonstra-se uma sinergia entre silício e cálcio, melhorando a absorção do cálcio em genótipos de feijão-caupi. Diante disso, a adição de silício em solução nutritiva, favorece de modo positivo a produção de matéria seca da parte aérea e das raízes em feijão-caupi (BUHELDT et al., 2020).

Figura 25. Concentração de Cálcio em folhas nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Portanto, na presente pesquisa, as concentrações de Ca⁺² estavam abaixo do mínimo considerado ideal por Malavolta et al. (1997) no grau de 40g/kg⁻¹ e ideais pela faixa proposta por Fageria et al. (1996) de 25 – 35 g kg⁻¹ na lâmina de 100% - ETC e com aplicação de silício. Bem como, as concentrações estavam superiores às constatações de Parry et al. (2008) com valor médio de 15,68 g kg⁻¹ em feijão-caupi.

4.3 Variáveis de crescimento e fitomassa

Verificou-se que o teste F para a interação lâmina x silício x genótipos de feijão-caupi do solo foi significativa ($P < 0,01$ e $0,05$), indicando existir uma dependência entre os fatores para o diâmetro caulinar (DC), a eficiência do uso da água (EUA), a massa seca de raiz (MSR), a massa seca da parte aérea (MSPA) e a massa seca total (MST). Também, houve efeito significativo da interação lâminas x silício para a área foliar. Com relação aos fatores isolados houve significância de lâminas e silício para a altura de planta (AP), taxa de crescimento absoluta (TCA) e a taxa de crescimento relativo (TCR) em genótipos de feijão-caupi (Tabela 10). Resultado semelhante foi obtido por Oliveira (2020) ao constatarem efeito da interação genótipos x restrição hídrica na área foliar de genótipos de feijão-caupi.

Tabela 10. Resumo da análise de variância para as variáveis altura de planta (AP), diâmetro caulinar (DC), área foliar (AF), eficiência do uso de água pelas plantas (EUA), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), massa seca de raiz (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST) nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera, BRS Pujante e BRS Pajeú, submetidos a duas lâminas de irrigação e com e sem silício.

FONTE DE VARIACÃO	GL	QUADRADOS MÉDIOS								
		AP	DC	AF	EUA	TCA	TCR	MSR	MSPA	MST
Bloco	3	43,05 ^{ns}	3,09 ^{ns}	8738,25 ^{ns}	1864,53 ^{ns}	0,016 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,21 ^{ns}	61,51 ^{ns}	68,62 ^{ns}
Lâmina (LM)	1	7413,99**	136,24**	616769,08**	337155,89**	0,204*	0,0006*	4,80**	1318,69**	1482,85**
Erro A	3	75,50	1,90	6619,43	996,62	0,0095	0,00003	0,97	4,75	3,67
Silício (SI)	1	6746,20**	114,42**	517580,90**	40432,40**	0,15**	0,00020 ^{ns}	10,04**	3984,53**	4394,35**
Genótipo (GE)	2	15,45 ^{ns}	3,25 ^{ns}	83673,32**	15,36,61*	0,015 ^{ns}	0,00032 ^{ns}	3,28**	25,29 ^{ns}	18,26 ^{ns}
LM x SI	1	225,55 ^{ns}	2,77 ^{ns}	4705,66 ^{ns}	21330,01**	0,016 ^{ns}	0,00013 ^{ns}	3,38**	328,49**	398,64**
LM x GE	2	48,63 ^{ns}	10,30**	15051,70*	4647,95**	0,032 ^{ns}	0,00022 ^{ns}	0,71**	10,21 ^{ns}	13,46 ^{ns}
SI x GE	2	216,11 ^{ns}	0,83 ^{ns}	6414,83 ^{ns}	111,98 ^{ns}	0,002 ^{ns}	0,00003 ^{ns}	1,08**	175,64**	194,80**
LM x SI x GE	2	297,24 ^{ns}	4,87*	3350,72 ^{ns}	5621,70**	0,009 ^{ns}	0,00006 ^{ns}	0,46**	335,98**	326,08**
Erro B	30	133,05	1,45	4469,36	371,44	0,010	0,00016	0,08	13,85	14,40
CV (A) (%)	-	15,85	12,47	13,73	22,91	31,95	17,17	16,24	8,44	6,91
CV (B) (%)	-	21,04	10,89	11,28	13,98	34,14	36,92	14,85	14,40	13,67

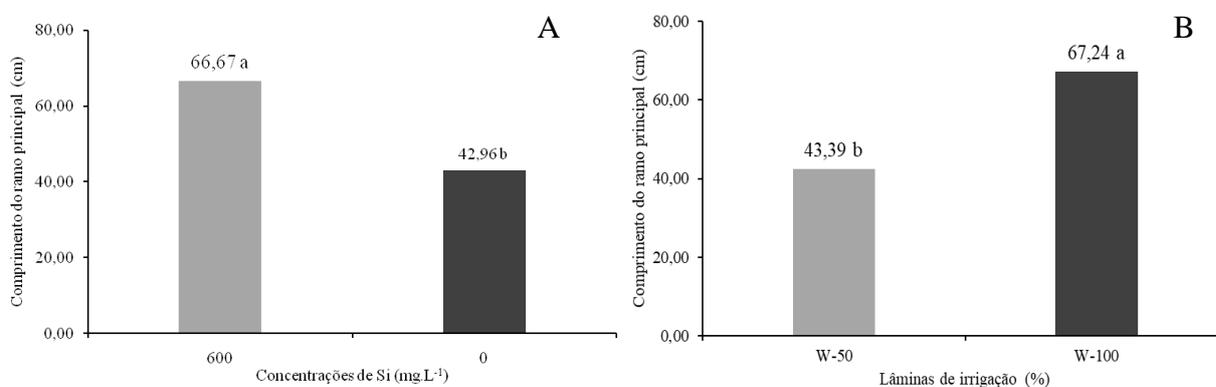
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

^{ns}= não significativo; ** significativo ao nível de 1% probabilidade; * significativo ao nível de 5% probabilidade; CV= Coeficiente de Variação (%).

Os genótipos de feijão-caupi que receberam aplicação foliar de ácido silícico apresentaram maior comprimento do ramo principal em comparação aos mesmos genótipos que não receberam o elemento, cujos valores forem de 66,67 cm e 42,96 cm, respectivamente, equivalente a uma superioridade de 55,19% (Figura 26A). Com esse resultado, o silício minimizou o efeito adverso das altas taxas de evaporação de referência, proporcionando maior eficiência do uso da água, pois, quando uma planta possui silício, conseqüentemente realiza um controle osmótico, ou seja, controla melhor a perda de água, permanecendo por mais tempo com os estômatos abertos, permitindo a entrada de CO₂ para a fotossíntese, bem como favorecendo o crescimento de genótipos de feijão-caupi. Corroborando com Mauad et al. (2016) ao reportarem em sua pesquisa que o silício pode afetar processos bioquímicos, fisiológicos e fotossintéticos, resultante em efeitos benéficos sobre diversas culturas, principalmente sob estresses abióticos.

Ao comparar os genótipos de feijão-caupi cultivados sem e com déficit hídrico, observa-se uma superioridade de 54,97% das plantas cultivadas sem estresse hídrico em comparação as plantas com 50% de restrição hídrica com valores médios de 67,24 cm e 43,39 cm, respectivamente (Figura 26B). A superioridade está correlacionada aos fatores abióticos, tais como: alta temperatura do ar (> 30⁰C) e a baixa umidade relativa do ar inferior a 50%, proporcionando alta taxa de evaporação de referência superior 1700 mm/ano⁻¹ em Catolé do Rocha-PB (MESQUITA et al., 2021).

Figura 26. Comprimento do ramo principal nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e lâminas de irrigação (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.

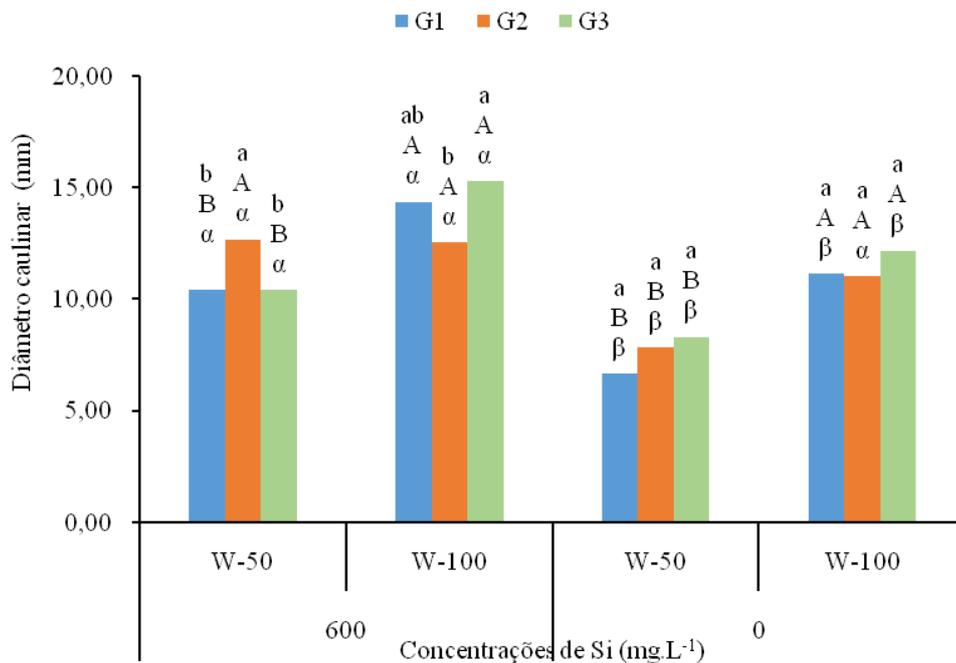


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Assim, nas plantas sob déficit hídrico ocorreram fechamento dos estômatos no período de maior insolação, diminuindo a fotossíntese, e conseqüentemente, restringindo o crescimento radicular e a zona de exploração das raízes no solo, refletindo em menor crescimento em altura de genótipos de feijão-caupi. Resultado semelhante às constatações de Farouk e Amany (2012), no qual o déficit hídrico prejudicou o crescimento das plantas de feijão-caupi e diminuiu o rendimento e a sua qualidade.

Os maiores valores do diâmetro caulinar aos 45 dias após o semeio (DAS) foram obtidos nos genótipos BRS Novaera e BRS Pajeú cultivados sem déficit hídrico e com aplicação foliar de ácido silícico, e para o genótipo BRS Pujante com e sem restrição hídrica e aplicação foliar de ácido silícico, que não diferiram entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Em contraparte, os menores diâmetros caulinares foram obtidos com a lâmina de 50% da evaporação de referência ($-ET_0$) sem aplicação de silício via foliar, independentemente, dos genótipos de feijão-caupi (Figura 27).

Figura 27. Diâmetro caulinar nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Mesmo em região com uma evaporação de referência superior a 1700 mm/ano⁻¹, o silício proporcionou melhor eficiência do uso da água em genótipos de feijão-caupi, o que afirmou Santos et al. (2022) em sua pesquisa sobre a aplicação exógena de prolina associado ao silício que atenuaram o déficit hídrico nas cultivares de feijão-caupi em duas fases fenológicas. Dessa maneira, sob condições de déficit hídrico, o silício desempenha um importante papel sobre os aspectos fisiológicos, metabólicos e funcionais nas plantas (SILVA et al., 2019).

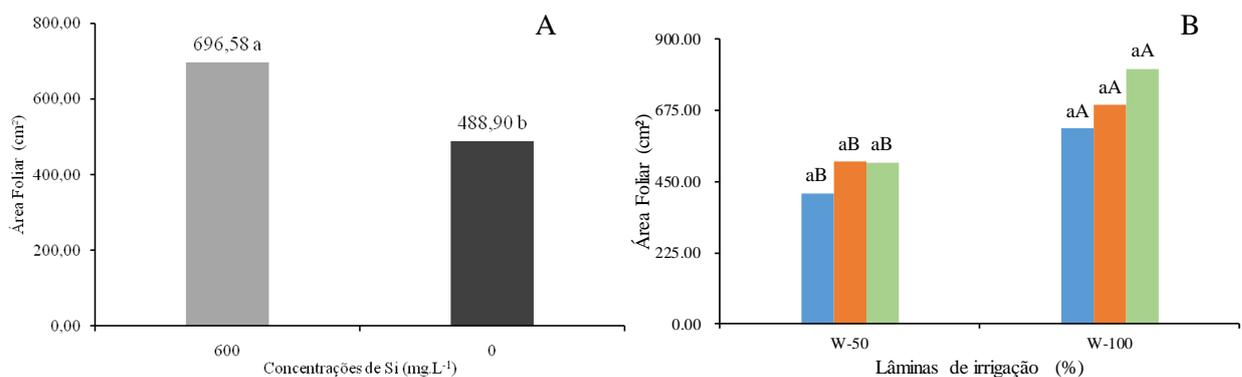
Comparativamente, os diâmetros caulinares dos genótipos de feijão-caupi foram similares, quando submetidos à deficiência hídrica e aplicação via foliar de ácido silícico, sem déficit hídrico e ausência da aplicação via foliar de ácido silícico. Este resultado demonstra a importância da adubação alternativa com silício em uma região semiárida, onde habitualmente ocorrem verões secos e quentes, e a estiagem prolongada proporcionará grande impacto tanto na produtividade como na qualidade das colheitas. A deficiência hídrica é um dos principais fatores que limitam o crescimento e a produtividade de culturas. Muitas espécies de plantas acumulam quantidades substanciais de silício em seus tecidos, o que proporciona melhor crescimento, fertilidade e resistência aos estresses abióticos e bióticos quando supridas com quantidades adequadas, influenciando em um dos processos mais dinâmicos e importantes da vida vegetal, ou seja, a fotossíntese (RASTOGI et al., 2021).

As plantas que receberam aplicação foliar do ácido silícico foram superiores àquelas que não receberam aplicação do silício, cujos valores foram de 696,58 cm² e 488,90 cm² com uma superioridade de 42,87% (Figura 28A). Fato também reportado por Silva et al. (2020), que observaram maiores valores de área foliar em genótipos de feijão-caupi com aplicação foliar de silício. A superioridade pode estar relacionada com a melhor eficiência do uso da água pelas plantas somada a utilização da adubação alternativa de silício, uma vez que a microrregião de Calolé do Rocha está inserida na região semiárida com temperatura do ar e do solo em média de 36,50°C e 30°C, respectivamente. Dessa forma, o silício busca promover ajustamentos morfofisiológicos que restabelecem a fisiologia vegetal através da regulação da expressão de muitos genes fotossintéticos e proteínas, com os conjuntos do fotossistema I (PSI e PSII), bem como um melhor desempenho na condutância estomática, correspondendo a um maior crescimento, inclusive da área foliar do feijão-caupi (MUKARRAN et al. 2022).

Ao desdobrar a interação lâminas x genótipos, observa-se que não há diferença estatística dos genótipos dentro de cada lâmina pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Para as lâminas dentro de cada genótipo, houve efeito significativo pelo teste F (0,01). Os maiores valores da área foliar, independentemente do genótipo, foram para as plantas irrigadas e sem estresse

hídrico em comparação as plantas irrigadas com 50% lâmina de água, destacando-se o genótipo BRS Pajeú com maior área foliar. A superioridade está relacionada a um aumento da temperatura média do solo na ordem de 13°C entre as parcelas sem e com déficit hídrico (Figura 28B), refletindo em maior evapotranspiração das plantas sob insuficiência hídrica, corroborando com o fechamento dos estômatos no horário de maior insolação, e por vez, diminuindo o crescimento da área foliar em genótipos de feijão-caupi, conforme reportado por Yavas e Keser (2021), que observaram claramente que o crescimento das plântulas de feijão-caupi diminuiu com o aumento da temperatura, porém o silício atenuou estes efeitos, somado ao estudo de Shi et al. (2016), que analisou o papel do Si quanto a tolerância ao estresse hídrico, através do aumento da condutância e captação de água em plantas. Além de desempenhar uma função muito importante em relação à regulação do processo fotoquímico, promovendo a fotossíntese (ZHANG et al., 2018).

Figura 28. Área foliar nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F(A). Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F (B).

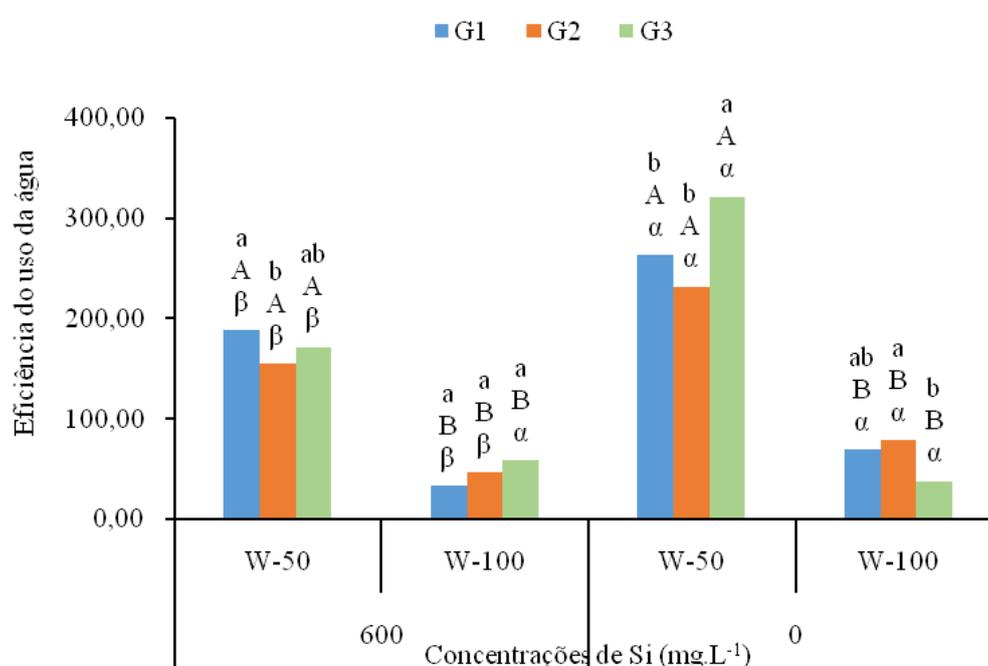


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A eficiência do uso da água pelas plantas é caracterizada como a quantidade de água evapotranspirada por uma cultura para a produção de certa quantidade de massa da matéria seca. Os maiores valores médios de eficiência do uso da água foram nos genótipos de feijão-caupi cultivados com déficit hídrico sem aplicação de silício via foliar, que não diferiram entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$), destacando-se o genótipo BRS Pajeú. Em contrapartida, os

menores valores médios foram nos genótipos cultivados sem déficit hídrico e com aplicação via foliar de ácido silícico, evidenciando-se também o genótipo BRS Pajeú, que não difeririam entre si (Figura 29). Nesse contexto, o Si promove uma barreira física devido ao acúmulo desse elemento nas células epidérmicas da superfície foliar resultando em menor transpiração (CANTUÁRIO et al., 2014).

Figura 29. Eficiência do uso da água nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



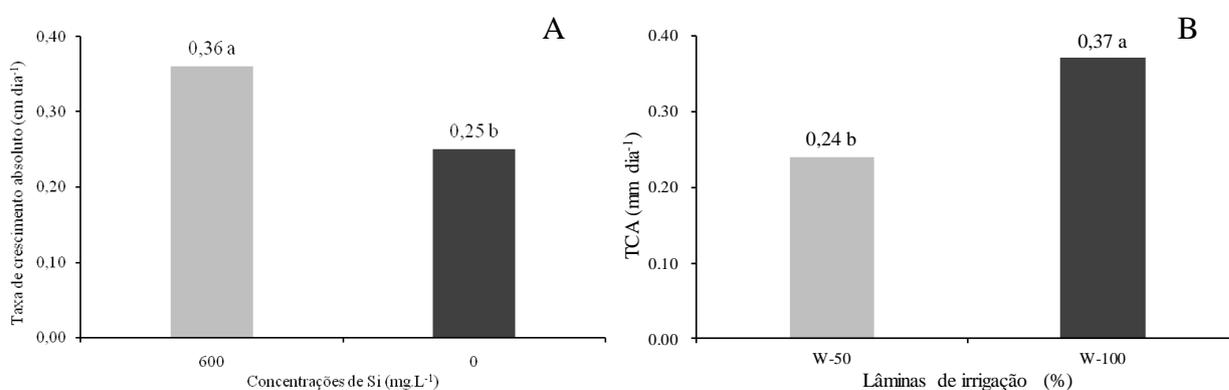
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Comparativamente, os genótipos de feijão-caupi que receberam adubação foliar com ácido silícico apresentaram maiores taxas de crescimento absoluto do diâmetro em comparação àquelas formadas sem aplicação do silício, cujos valores foram de $0,36 \text{ cm dia}^{-1}$ e $0,25 \text{ cm dia}^{-1}$, respectivamente, resultando em uma superioridade de 44%, indicando que o silício favorece o crescimento do diâmetro caulinar do feijoeiro (Figura 30A). Entretanto, ressalta-se que, quando os genótipos de feijão-caupi receberam aplicação via foliar de ácido silícico, houve contribuição significativa nos seus padrões de crescimento, evidenciando resposta positiva nas cultivares estudadas. O silício (Si) acumula-se constantemente nos tecidos vegetais, principalmente nas raízes de dicotiledôneas, tais como o feijão-caupi

(PEREIRA et al., 2018), atenuando os efeitos adversos dos fatores abióticos, tais como, alta temperatura do ar e do solo e condutividade elétrica d'água superior $1,0 \text{ dS m}^{-1}$, refletindo dessa maneira em maior crescimento do diâmetro caulinar.

Com relação às lâminas de irrigação, os genótipos irrigados com 100% da evaporação de referência - ET_0 , apresentaram taxa de crescimento absoluta do diâmetro caulinar superiores àqueles mesmos genótipos irrigados com 50% da evaporação de referência - ET_0 , cujos valores foram de $0,37 \text{ mm dia}^{-1}$ e $0,24 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente, com superioridade de 54,17% (Figura 30B). Nas plantas submetidas ao déficit hídrico, a disponibilidade de água nas folhas torna-se insuficiente, há uma redução do potencial foliar, provocando a diminuição da pressão de turgor das células-guarda e, conseqüentemente o fechamento dos estômatos. Assim, origina-se uma força propulsora maior para absorção de CO_2 , permitindo que essas plantas funcionem com aberturas estomáticas menores e, desse modo, as taxas de crescimento serão inferiores (TAIZ et al. 2017), afetando a fotossíntese.

Figura 30. Taxa de crescimento absoluto (TCA) nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.

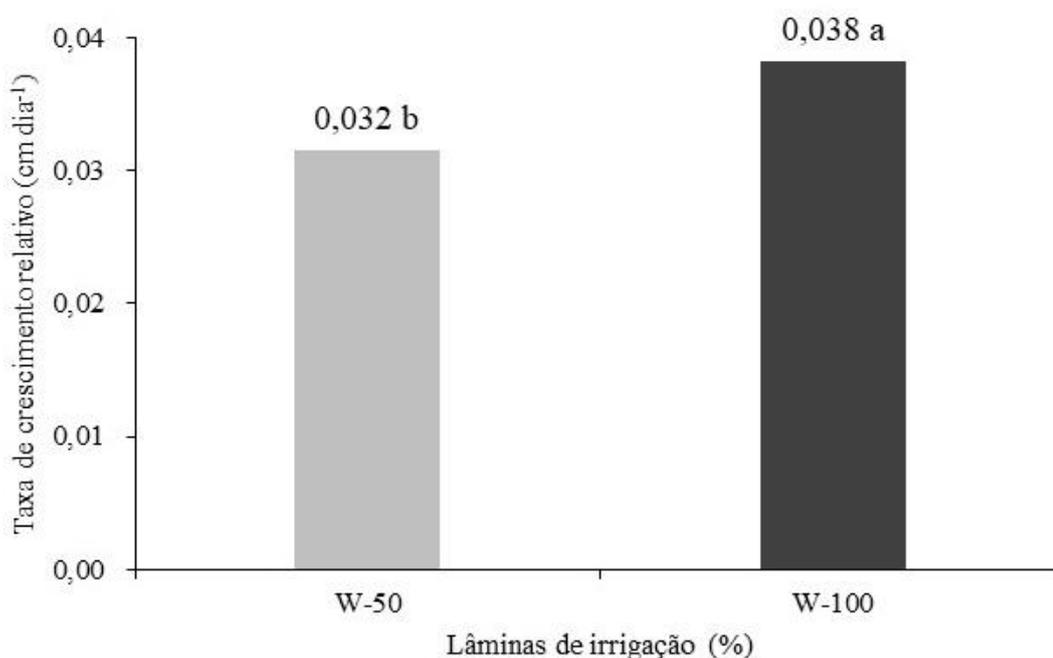


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A taxa de crescimento relativo é apropriada para avaliação do crescimento vegetal, dependente da quantidade de material acumulado gradativamente (OLIVEIRA et al. 2011). Ao comparar a taxa de crescimento relativo do diâmetro caulinar, os genótipos de feijão-caupi irrigados com 100% de evaporação de referência — ET_0 — apresentaram maiores índices em comparação àqueles mesmos genótipos, irrigados com 50% — ET_0 —, cujos valores foram de $0,038 \text{ mm dia}^{-1}$ e $0,032 \text{ mm dia}^{-1}$, equivalente à superioridade de 18,75%, respectivamente (Figura 31). A superioridade está relacionada à deficiência hídrica, irrigada com 50% da

evaporação de referência em uma região com alta temperatura, que proporciona uma evaporação de referência superior a 1700 mm/ano^{-1} . Assim, quando as folhas não estão bem hidratadas e o seu potencial hídrico é irrisório, ocorre o fato descrito em Taiz et al. (2017), sobre a diminuição do turgor das células-guarda e o fechamento dos estômatos, restringindo dessa forma, a altura da planta, o número de folhas e a massa seca do feijão-caupi, atuando diretamente na redução das taxas de crescimento absoluto e relativo (TETTEH et al., 2020).

Figura 31. Taxa de crescimento relativo do diâmetro (TCR) de genótipos de feijão em função de duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

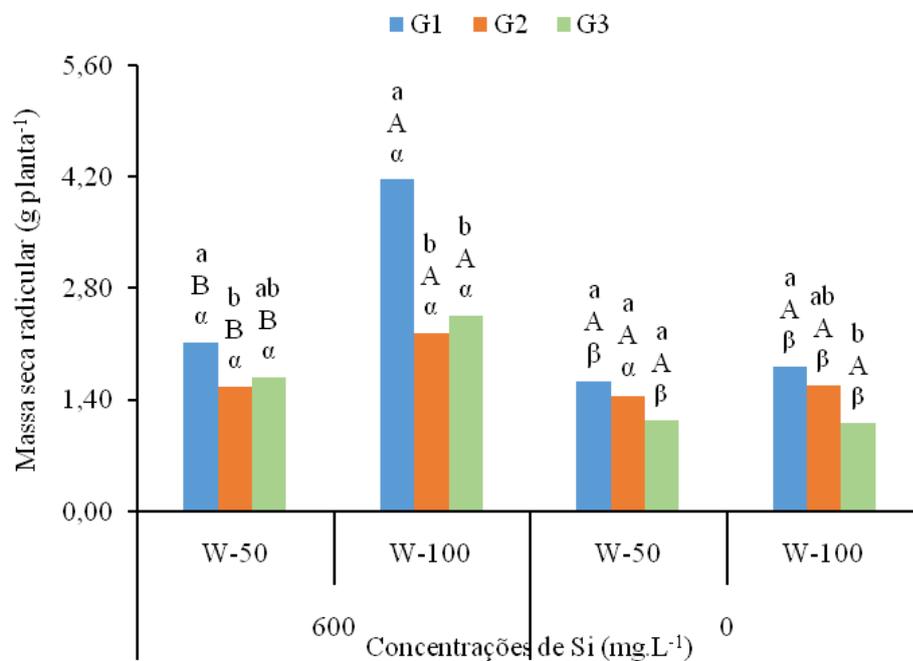
Os maiores valores de massa seca de raiz no estágio R2 foram obtidos com aplicação de ácido silício associado à lâmina de 100% da evaporação de referência – ET_0 , sendo que a maior massa de raiz aconteceu no genótipo BRS Novaera, que deferiu estaticamente dos demais tratamentos pelo teste Tukey ($p < 0,05$) (Figura 32).

Em regiões semiáridas com altas taxas de evapotranspiração, a irrigação com déficit hídrico, no caso, dos genótipos irrigados com 50% ET_0 implica em fechamento dos estômatos no período de maior insolação, inviabilizando o processo de fotossíntese, que inibe a produção de fotoassimilados, e conseqüentemente, um menor crescimento e produção, por causa da insuficiência do suprimento de CO_2 . Esse fato foi reportado por Munjonji e Ayisi (2021), as trocas gasosas desempenham um papel crítico na determinação da produtividade

das culturas, uma vez que controlam tanto o ganho de CO₂ como a perda de água. Vale ressaltar que o déficit hídrico afeta diretamente a área foliar, a matéria seca total, taxa fotossintética, condutância estomática em feijão-caupi (FREITAS et al., 2017).

Ainda sobre a massa seca da raiz, os genótipos de feijão-caupi irrigados com déficit hídrico (50% - ET₀) e aplicação via foliar de silício foram superiores aos genótipos irrigados sem déficit hídrico (100% - ET₀) e sem silício, demonstrando a eficiência do silício para mitigar os efeitos adversos do déficit hídrico, mesmo com a temperatura média do solo na ordem de 34,72°C e 47,65°C entre as lâminas de 100% e 50% da ET₀, respectivamente. Assim, o silício restabelecerá a distribuição do sistema radicular, afetando positivamente o crescimento e a massa seca de raízes em genótipos de feijão-caupi. Além de que, beneficia sua arquitetura para captação de água e minerais, bem como a fertilidade do solo (SHAMSHIRIPOUR et al., 2022), comprovado em pesquisas com soja.

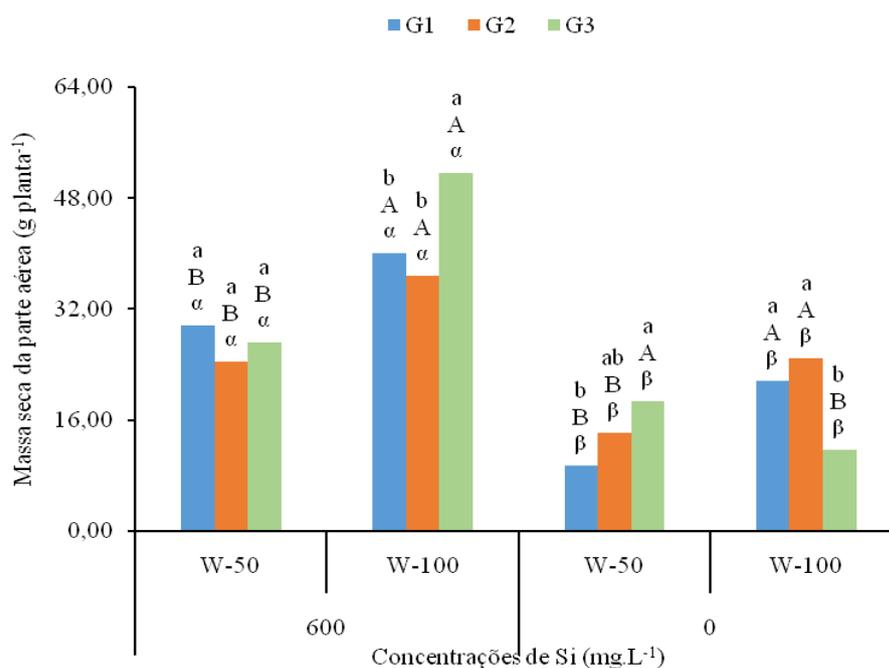
Figura 32. Massa seca radicular nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

No desdobramento da interação silício x lâminas x genótipos, as maiores massas da parte aérea no estágio R2 (floração) foram alcançadas nos genótipos irrigados sem estresse hídrico (100% - ET₀) com aplicação via foliar de ácido silícico, evidenciando-se o genótipo BRS Pajeú, significativo dos demais tratamentos pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Ao contrário, as menores massas da parte aérea foram nos genótipos irrigados com déficit hídrico e sem aplicação de silício (50% - ET₀), destacando-se também o genótipo BRS Pajeú. Com isso, nota-se que o genótipo BRS Pajeú é o mais sensível ao déficit, dentre os genótipos estudados (Figura 33). A superioridade pode estar relacionada à alta temperatura média do ar de 37°C, que diminuiu a umidade do solo em volume na ordem de 6% em comparação as parcelas sem déficit hídrico, afetando o crescimento, a massa das raízes e da parte aérea, comprometendo os processos fisiológicos e a capacidade de produção, fato confirmado por Jayawardhane et al. (2022), no qual o déficit hídrico altera os atributos do solo, induzindo alterações nos parâmetros morfológicos, fisiológicos e metabólicos das plantas de feijão-caupi. Fato também reportado por Melo et al. (2022), as condições de déficit hídrico afetam a fisiologia do feijão-caupi e o rendimento em condições semiáridas tropicais.

Figura 33. Massa seca da parte aérea nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



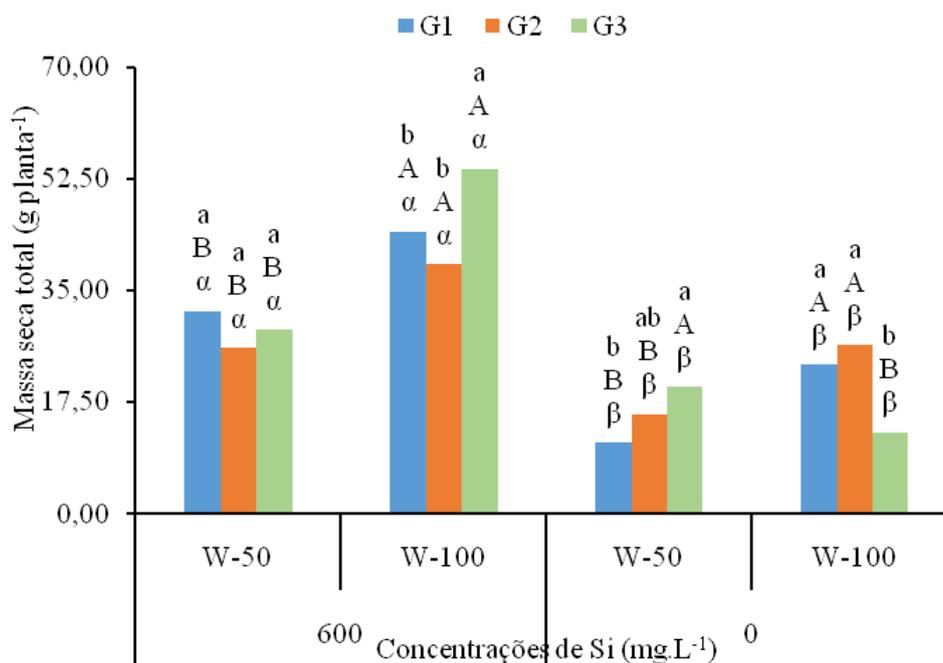
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A massa seca da parte aérea apresentou o mesmo comportamento do diâmetro caulinar, da massa seca de raiz, ou seja, os genótipos de feijão-caupi cultivados sob deficiência hídrica com aplicação via foliar de silício apresentaram maior massa seca da parte aérea em comparação aos mesmos genótipos cultivados sem déficit hídrico e sem aplicação via foliar de silício, reforçando que adubação com silício amenizam os efeitos adversos da escassez hídrica. O silício incrementa o ganho de matéria seca, por meio da atenuação das perdas de água por transpiração, o que favorece as funções fisiológicas em cultivares de arroz, mesmo com insuficiência hídrica (MORO et al., 2015). Em consonância, em sua pesquisa Silva et al. (2019), confirmaram que o Si proporcionou o crescimento das cultivares de feijão-caupi BRS Aracê e BRS Rouxinol, que atingiram maiores valores médios para a área foliar, a matéria fresca e taxa de crescimento absoluta e relativa, em comparação com as outras cultivares sujeitas ao mesmo tratamento.

As plantas cultivadas sem déficit hídrico e com aplicação de silício apresentaram maior produção de massa seca total, sobressaindo-se o genótipo BRS Pajeú, diferindo dos demais tratamentos pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Os genótipos apresentaram o mesmo comportamento do crescimento, indicando que o silício atenua os efeitos adversos dos fatores abióticos. Em contrapartida, as menores massas foram registradas nos genótipos sob déficit hídrico e sem aplicação via foliar de silício, destacando-se o genótipo BRS Novaera (Figura 34). Esse resultado expressa que, para o cultivo do feijão-caupi alcançar grande produção em regiões semiáridas, é necessário a utilização da técnica adequada de irrigação para minimizar os efeitos adversos do déficit hídrico, pois a estiagem prolongada é uma das principais restrições ambientais que favorece a redução no rendimento das plantas, bem como o crescimento em genótipos de feijão-caupi. Esse resultado semelhante foi obtido por Mousavi et al. (2020) ao observarem a diminuição da produção de biomassa em feijão-caupi sob insuficiência hídrica.

Comparativamente, os genótipos irrigados com a lâmina de 50% da ET_0 e com aplicação de silício apresentaram maior índice de massa seca total em comparação aos mesmos tratamentos irrigados com 100% ET_0 , mas sem aplicação via foliar de silício. Evidencia-se desta forma, que o silício atenua os efeitos negativos do déficit hídrico, melhorando a eficiência do uso da água, fato confirmado na presente pesquisa, mesmo em uma região semiárida com alta taxa evaporativa, sendo a sua aplicação imprescindível para elevar o aporte de massa seca total, podendo impactar sobre a produção.

Figura 34. Massa seca total nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), submetidos a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar. Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey, maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O resultado do estudo está semelhante às constatações de Zhang et al. (2018), confirmando que o silício desempenha um papel de atenuador do déficit hídrico, modulando alguns genes relacionados ao processo fotoquímico, e assim promovendo a fotossíntese. Além de possuir função benéfica quanto aos procedimentos fisiológicos e/ou bioquímicos, sugerindo que a adubação alternativa com silício pode ser aplicada nas culturas em zonas áridas e semiáridas.

4.4 Componentes de produção

Na Tabela 11, observa-se que existe diferença significativa ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F no comprimento da vagem verde (CVV) em genótipos de feijão-caupi em relação à interação lâmina x silício x genótipos, indicando dependência dos fatores. Também, houve diferença significativa a 1% de probabilidade para os fatores isolados lâminas, silício e genótipos em relação ao diâmetro verde da vagem (DVV) e para os fatores lâminas e genótipos nas variáveis, número de grãos por vagem verde (NGVV), peso da vagem

verde (PVV), peso de grãos por vagem verde (PGVV). Já para número de vagens secas por planta (NVPS) houve efeito isolado dos fatores lâminas, silício e genótipos de feijão-caupi. Ainda, verificou-se efeito significativo, a 1% de probabilidade, para a interação silício x genótipos para a produtividade (PROD) em genótipos de feijão-caupi.

Tabela 11. Resumo da análise de variância para as variáveis Comprimento da vagem verde (CVV), Diâmetro da vagem verde (DVV), Número de Grãos por vagem verde (NGVV), Peso da vagem verde (PVV), Peso de grãos por vagem verde (PGVV), Número de vagens secas por planta (NVPS) e Produtividade de grãos secos (PROD) nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera, BRS Pujante e BRS Pajeú, submetidos a duas lâminas de irrigação e com e sem silício.

FONTE DE VARIÇÃO	GL	QUADRADOS MÉDIOS						
		CVV	DVV	NGVV	PVV	PGVV	NVPP	PROD
Bloco	3	5,50 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,27 ^{ns}	1,29 ^{ns}	0,45 ^{ns}	1,31 ^{ns}	42760,63 ^{ns}
Lamina (LM)	1	19,52 ^{ns}	0,14 ^{ns}	16,33*	11,31*	6,68*	38,10**	3298685,88*
Erro A	3	2,47	0,30	1,38	0,90	0,56	0,88	190185,27
Silício (SI)	1	14,05**	1,22*	0,08 ^{ns}	1,04 ^{ns}	0,16 ^{ns}	23,98**	5140835,70**
Genótipo (GE)	2	293,58**	3,48**	99,14**	21,36**	14,79**	246,48**	3311895,22**
LM x SI	1	1,10 ^{ns}	0,30 ^{ns}	4,08 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,09 ^{ns}	2,02 ^{ns}	1459,71 ^{ns}
LM x GE	2	6,11*	0,18 ^{ns}	5,77 ^{ns}	2,79 ^{ns}	2,16 ^{ns}	0,60 ^{ns}	58972,55 ^{ns}
SI x GE	2	0,62 ^{ns}	0,10 ^{ns}	1,39 ^{ns}	0,47 ^{ns}	0,11 ^{ns}	3,13 ^{ns}	497508,97**
LM x SI x GE	2	5,45**	0,61 ^{ns}	1,02 ^{ns}	2,22 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,16 ^{ns}	52283,23 ^{ns}
Erro B	30	1,17	0,23	2,21	1,73	0,91	1,04	65291,85
CV (A) (%)	-	7,34	5,36	8,95	10,37	12,28	16,57	20,22
CV (B) (%)	-	5,07	4,68	11,31	14,35	15,57	17,95	11,85

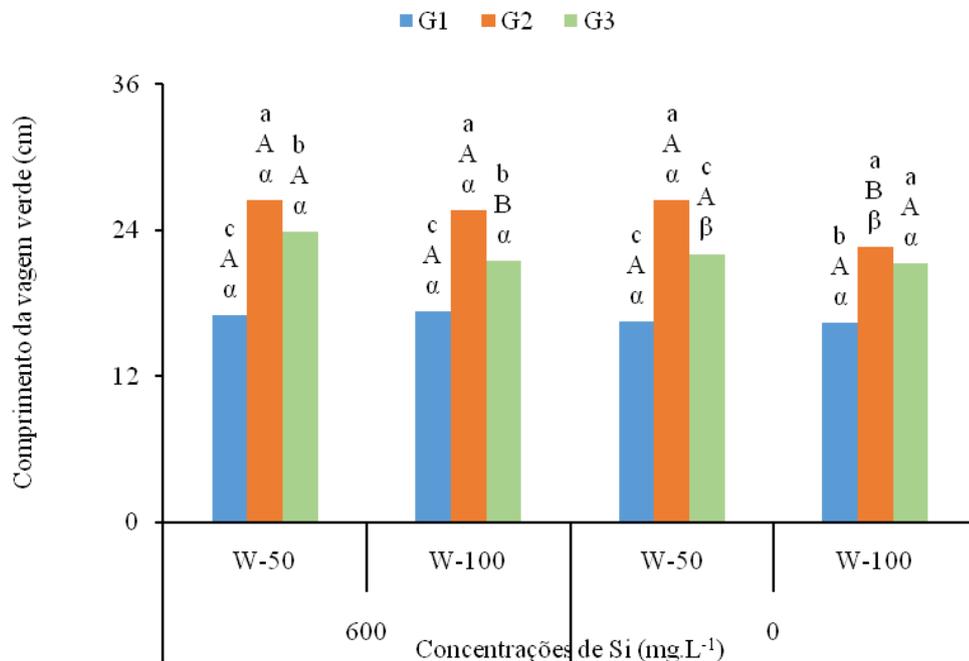
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

^{ns}= não significativo; ** significativo ao nível de 1% probabilidade; * significativo ao nível de 5% probabilidade; CV= Coeficiente de Variação (%).

Ao desdobrar a interação lâmina x silício x genótipos, os maiores e menores comprimentos de vagem verde, foram para os genótipos BRS Pujante (G2) e BRS Novaera (G1), independentemente da fonte de variação, cujos valores foram de 22,63 cm e 16,45 cm, respectivamente, irrigados com a lâmina de 100% e 50% da evapotranspiração da cultura sem aplicação via foliar de silício, equivalente à superioridade de 37,57%, indicando que o genótipo BRS Pujante é mais tolerante ao déficit hídrico do que o genótipo BRS Novaera (Figura 35), fato reportado por Nascimento et al. (2011), Freitas et al.

(2013) e Soares et al. (2021) que constataram redução na produção, quando o feijão-caupi foi submetido ao déficit hídrico. A superioridade também está correlacionada às características intrínsecas dos genótipos, no qual o genótipo BRS Pujante apresenta comprimento de vagem de 18,4 cm (SANTOS et al. 2007), e para Freire Filho et al. (2008) o BRS Novaera apresenta 15 cm de comprimento de vagem.

Figura 35. Comprimento da vagem verde nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

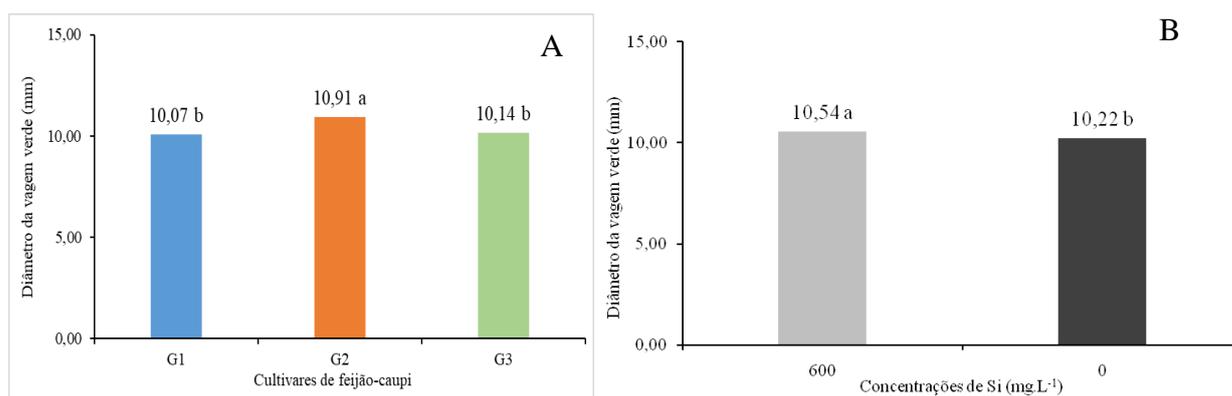
Ao comparar, a lâmina de 100% sem aplicação de silício e a lâmina de 50% com aplicação de silício, observa-se superioridade da lâmina de 50% em relação ao comprimento de vagem verde, independentemente do genótipo de feijão-caupi. Mesmo em uma região semiárida com temperatura média do ar de $36,49^{\circ}\text{C}$, o silício atenuou o efeito deletério do fator abiótico da temperatura, promovendo adaptações fisiológicas em genótipos de feijão-caupi, e assim, melhorou a eficiência do uso da água. Com isso, o silício desempenha funções relevantes quanto a resistência das plantas, em relação a mecânica e às diversas maneiras de livrar-se de déficits abiótico e biótico, além da interceptação de luz, melhorando tanto o rendimento quanto a qualidade (YAN et al., 2018). Silva et al. (2019) constataram que o Si

reduziu o efeito deletério do estresse no crescimento de feijão-caupi, através da regulação do metabolismo enzimático e da prolina. Ainda, Teodoro et al. (2015) confirmaram que a aplicação foliar de Si em condições de déficit hídrico, proporcionou o desenvolvimento normal das plantas de sorgo.

Os genótipos de feijão-caupi diferiram entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade, em relação ao diâmetro de vagem verde com maior e menor diâmetro de 10,91 mm e 10,07 mm referente aos genótipos BRS Pujante (G2) e BRS Novaera (G1), respectivamente, fato semelhante ao comprimento de vagem verde (Figura 36A).

Ao observar o maior diâmetro de vagem verde entre os genótipos que receberam aplicação via foliar do ácido silícico em comparação aos mesmos genótipos que não foram adubados com silício, os valores foram de 10,54 mm e 10,22 mm, respectivamente (Figura 36B). Essa superioridade pode ser atribuída à melhor nutrição dos genótipos de feijão-caupi que foram adubados com silício. Com isso, o Si causa alterações morfofisiológicas para adaptações às condições adversas de estresse biótico e abiótico, além de desenvolver de maneira positiva a capacidade fotossintética, reduzindo a taxa transpiratória (SANTOS et al., 2021).

Figura 36. Diâmetro da vagem verde nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($P > 0,05$) e pelo teste F ($P > 0,05$).



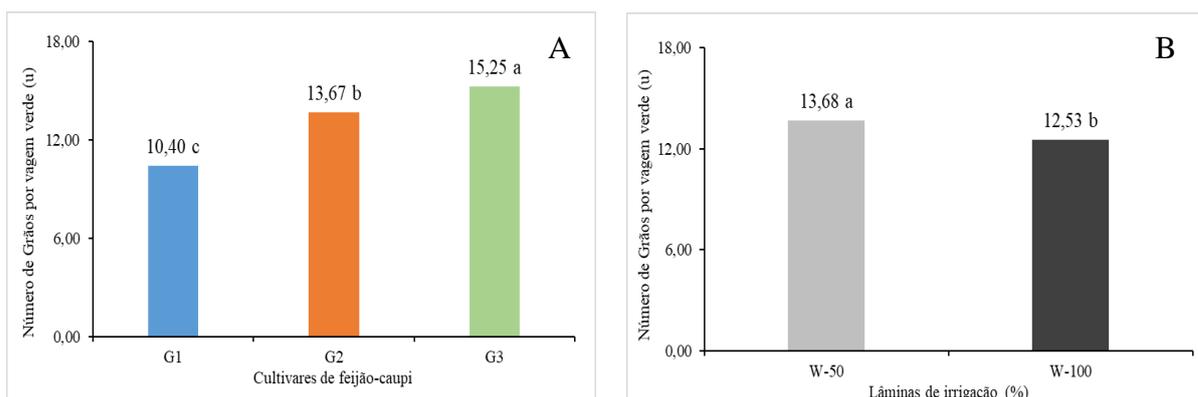
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os genótipos de feijão-caupi diferiram entre si pelo teste Tukey ($P > 0,05$) em relação ao número de grãos por vagem verde, com superioridade do genótipo BRS Pajeú (G3) de 46,63% e 11,56% em comparação aos genótipos de BRS Novaera (G1) e BRS Pujante (G2), cujos valores médios foram de 15,25; 10,40 e 13,67 grãos verdes por vagem, respectivamente

(Figura 37A). A superioridade do genótipo BRS Pajeú está correlacionada às características intrínsecas do próprio genótipo, conforme Freire Filho et al. (2008), o número médio de sementes por vagem são dezesseis (16), enquanto, no BRS Pujante, o número médio de sementes por vagem são nove (9) (SANTOS et al., 2007) e BRS Novaera, o número médio de sementes por vagem são dez (10) (FREIRE FILHO et al., 2008).

Ao comparar, as lâminas de 100% e 50% da evapotranspiração de cultura (ETc), observou-se uma superioridade de 9,18% no número de grãos por vagem verde na lâmina de 100% em comparação a lâmina de 50%, cujos valores foram de 12,53 e 13,68, respectivamente (Figura 37B). A superioridade dos genótipos de feijão-caupi cultivados sem déficit hídrico está orrelacionado aos fatores abióticos da alta temperatura do ar ($> 30^{\circ}\text{C}$) e a temperatura do solo nas lâminas de 50% e 100% ETc (47°C e 35°C), causando o fechamento dos estômatos dos genótipos, devido a escassez de água e o horário de maior insolação, como uma estratégia defensiva da planta. Com isso, diversas reações químicas, metabólicas e fisiológicas foram prejudicadas na lâmina de 50% ETc, provocando inibição de crescimento e produção, fato ocorrido na presente pesquisa e reportado por Barros et al. (2023) ao constataram que a temperatura é o fator climático mais limitante para o desempenho do feijão-caupi, independentemente da disponibilidade hídrica.

Figura 37. Número de grãos por vagem verde nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

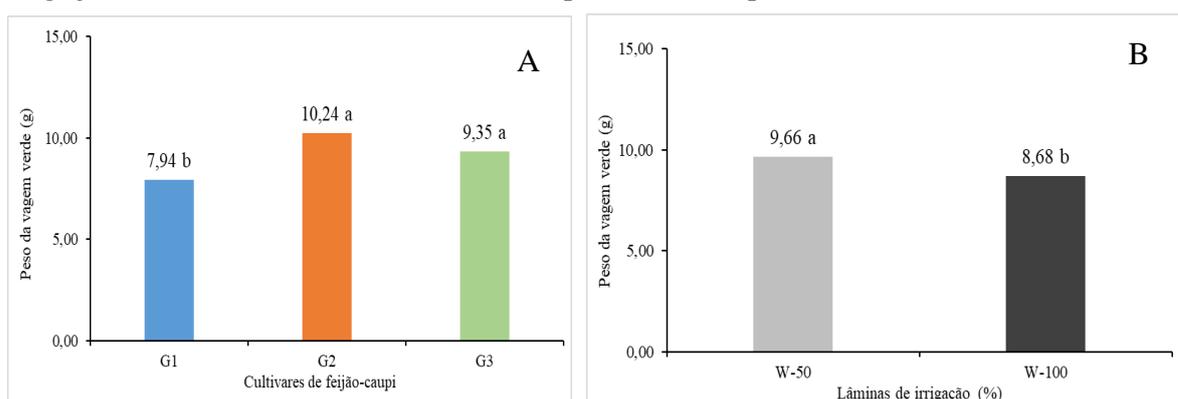
Os resultados da pesquisa estão coerentes com as constatações de Freitas et al. (2017) ao observaram que cultivares de feijão-caupi submetidas ao déficit hídrico após o florescimento produziram menor quantidade de sementes. Também, Jacinto Junior e Lucena

(2022) em seus estudos verificaram que as plantas de feijão-caupi são mais afetadas pela escassez hídrica nas fases reprodutivas de floração e frutificação.

Os genótipos de feijão-caupi BRS Pujante (G2) e o BRS Pajeú (G3) não diferiram entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade. Porém, foram estaticamente diferentes do genótipo BRS Novaera (G1) em relação ao peso de vagem verde. Os maiores pesos de vagem verde foram de 10,24 g e 9,35 g e o menor 7,94 g referentes aos genótipos BRS Pujante (G2), BRS Pajeú (G3) e o BRS Novaera (G1), respectivamente (Figura 38A). Esta superioridade pode estar relacionada ao maior comprimento de vagem, que proporcionou maior peso de vagem.

Os genótipos de feijão-caupi irrigados com 100% da evapotranspiração de cultura (ETc) apresentaram maiores pesos de vagem verde em comparação aos mesmos genótipos irrigados com 50% da ETc com superioridade de 11,29%, cujos pesos foram de 9,66 g e 8,68 g, respectivamente (Figura 38B). Esta superioridade pode estar relacionada ao maior conteúdo de água no solo irrigado com a lâmina de 100% ETc, em média 21% em volume, próximo da capacidade de campo do solo, e na lâmina de 50% ETc em média 15% em volume.

Figura 38. Peso da vagem verde nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) (A) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) (B) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

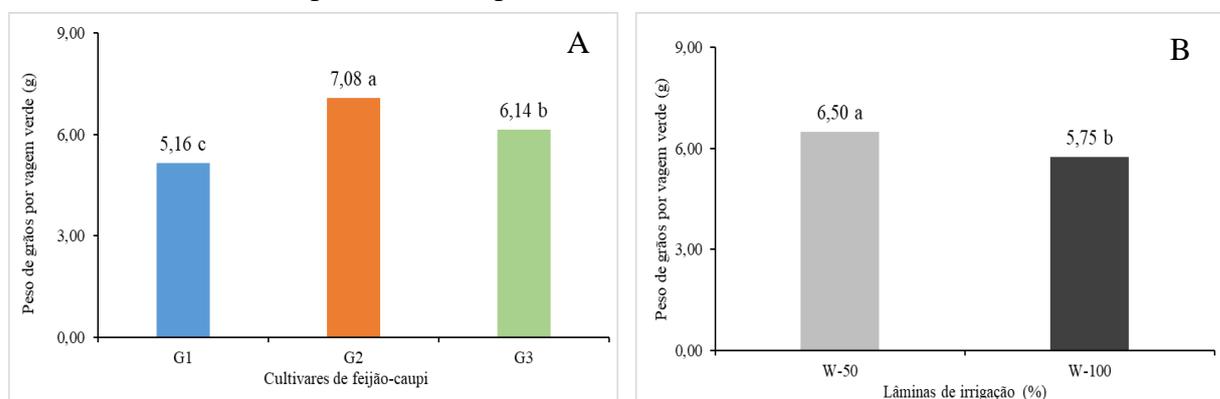
Assim, houve menor expansão das raízes dos genótipos irrigados com 50% da ETc. Isto ocorre devido à presença de inibidores de crescimento, que protege as plantas ou as suas partes de condições desfavoráveis do meio ambiente, como o déficit hídrico do solo. Fato confirmado por Ritte et al. (2022), na qual o déficit hídrico afetou de maneira negativa e

significativa o número de vagens e o rendimento de plantas de feijão-caupi. Além disso, a deficiência hídrica reduz a altura da planta, o número de folhas e a massa seca de cultivares de feijão-caupi, colaborando na diminuição da produção (TETTEH et al., 2020), fato esse confirmado na presente pesquisa.

Os genótipos de feijão-caupi foram significativamente diferentes pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, em relação ao peso de grãos por vagem. Os maiores e menores pesos de grão por vagem foram de 7,08 g e 5,16 g, equivalente a sua superioridade de 37,21%, referentes aos genótipos BRS Pujante (G2) e BRS Novaera (G1), respectivamente (Figura 39A). Essa superioridade está relacionada às características intrínsecas dos genótipos, cujos pesos de 100 sementes para o BRS Pujante foi de 24,8 g (SANTOS et al., 2007) e 20 g para BRS Novaera (FREIRE FILHO et al., 2008).

Os genótipos de feijão-caupi apresentaram menor peso de grãos por vagem quando irrigados sem déficit hídrico em comparação aos mesmos genótipos sob déficit hídrico, cujos pesos foram de 6,50 g e 5,75 g, proporcionando dessa maneira, uma superioridade de 13%, respectivamente (Figura 39B). Esta superioridade está relacionada a alta evaporação de referência na ordem de 2000 mm ano⁻¹ na microrregião de Catolé do Rocha-PB (MESQUITA et al. 2021), causando alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas nos genótipos de feijão-caupi, inibindo o crescimento e a produção.

Figura 39. Peso de grãos por vagem verde nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L⁻¹) e sem (0 mg.L⁻¹) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) (A) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) (B) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



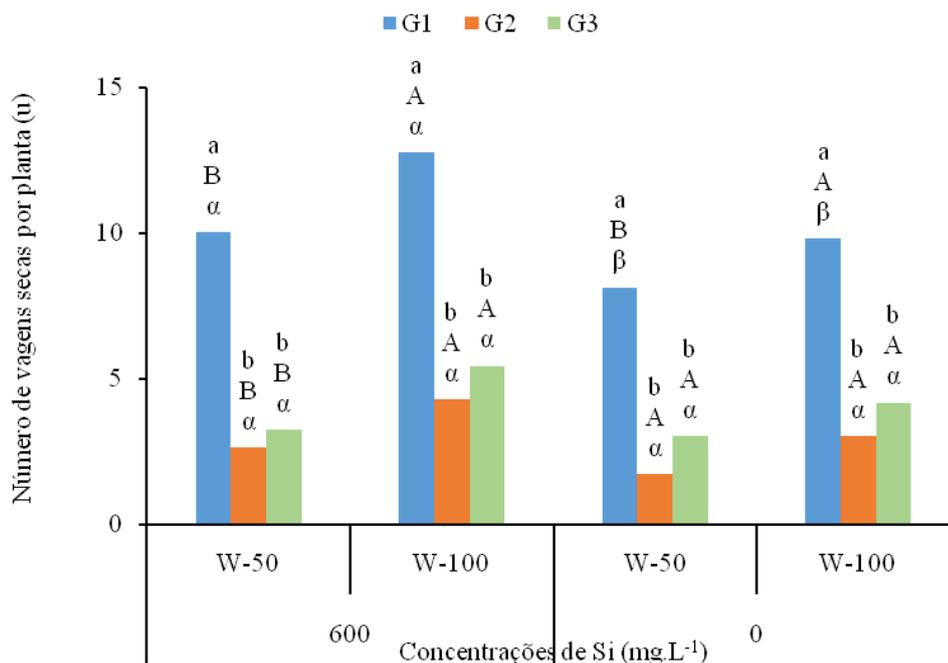
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Resultando semelhante foi constatado por Ferreira et al. (2023), ao verificarem que independentemente do período de cultivo do feijão-caupi, a insuficiência hídrica proporcionou

redução na produtividade e na biomassa. Bastos et al. (2012), também, constataram redução na produtividade de grãos verdes, quando as plantas de feijão-caupi foram submetidas a deficiência hídrica.

No desdobramento da interação lâminas x silício x genótipos de feijão-caupi, observou-se que independentemente da fonte de variação, o genótipo BRS Novaera (G1) produziu maior número médios de vagem por planta em comparação aos genótipos BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) (Figura 40). Ao verificar, a lâmina de 50% da ET_c com aplicação de silício com a lâmina de 100% sem aplicação de silício, notou-se que o número de vagens por planta mostrou-se similar, corroborando a eficiência do silício em mitigar os efeitos desfavoráveis do ambiente. Assim, o silício aumenta a absorção de água sob condições de déficit hídrico ao induzir a silicificação e suberização endodérmica da raiz, melhorando a força motriz da raiz. Além de melhorar a captação da água pelas cultivares, por meio do impulsionamento do ajustamento osmótico, evoluindo a atividade da aquaporina e a razão raiz/rebento (CHEN et al. (2018). Com isso, Sampaio et al. (2022) analisaram que a aplicação de silício aumentou o volume, o comprimento e a massa fresca das raízes de plantas de feijão-caupi.

Figura 40. Número de vagens secas por planta nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) e gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F.



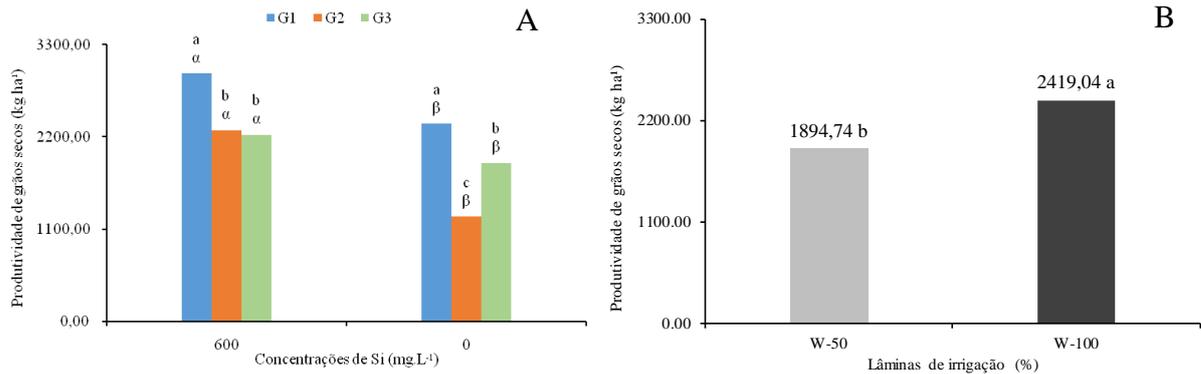
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Analisando o desdobramento de genótipos na aplicação de silício para produtividade de grãos, observou-se que o genótipo BRS Novaera (G1) mostrou-se significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey em relação aos genótipos BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3), que não diferiram entre si (Figura 41A). Já para o desdobramento de genótipo sem aplicação de silício, os genótipos foram estatisticamente diferentes com a relação à produtividade. As maiores e menores produtividades foram de 2952,23 kg/ha e 1245,32 kg/ha referente ao BRS Novaera (G1) e BRS Pujante (G2) com e sem aplicação via foliar do ácido silícico, respectivamente. Em contraparte, o BRS Novaera apresentou menor comprimento e diâmetro de vagem verde, menor número e peso de grãos de vagem verde, porém, obteve maior número de vagem por planta, proporcionando maior produtividade. Essas produtividades foram superiores e inferiores às constatações de Santos et al. (2007) e Freire et al. (2008) de 1546,8 kg/ha para BRS Novaera no estado do Rio Grande do Norte e de 1566 kg/ha para a BRS Pujante, respectivamente. Independente da fonte de variação, as produtividades foram superiores as safras de 2022 e 2023 do Brasil e do Nordeste, com produtividades médias de (648,30 kg/ha e 642,81 kg/ha) e (219,99 kg/ha e 218,44 kg/ha), respectivamente (IBGE, 2023), Também, foram superiores as produtividades apresentadas pela Companhia Nacional de Abastecimento com valores médios de 990 kg/ha e 1050 kg/ha, nas safras 2020/2021 e 2021/2022 (CONAB, 2022).

Ao comparar, as lâminas de 100% evapotranspiração da cultura (ETc) e 50% ETc, notou-se uma superioridade de 27,65% da lâmina de 100% ETc em comparação a lâmina de 50% ETc, com as produtividades nos valores de 2419,04 kg/ha e 1894,74 kg/há (Figura 41B).. A superioridade está correlacionada as adversidades das condições climáticas da microrregião de Catolé do Rocha-PB com a alta temperatura do ar ($>30^{\circ}\text{C}$) e do solo ($>40^{\circ}\text{C}$) no período de maior insolação, proporcionando uma evaporação de referência superior a 4 mm dia⁻¹.

Dessa maneira, com os genótipos de feijão-caupi sob déficit hídrico, ocorreu o processo de abertura e fechamento dos estômatos, inibindo os processos de transpiração, fotossíntese e respiração, pois a intensidade desses processos fisiológicos depende, principalmente, do grau de abertura dos estômatos, e é através dos estômatos que existe uma relação direta do interior da planta com o ambiente. Resultado semelhante aconteceu nos estudos de Ritte et al. (2022) ao constataram a diminuição do crescimento e rendimento em plantas de feijão-caupi. Ainda, Gnankambary et al. (2020) verificaram que a deficiência hídrica possui efeito negativo na produção de sementes de feijão-caupi. Além de Hayatu et al. (2014) que reportaram em sua pesquisa que o déficit hídrico reduziu a área foliar, o teor relativo de água e a produtividade de grãos entre os genótipos de feijão-caupi.

Figura 41. Produtividade de grãos secos nas cultivares de feijão-caupi: BRS Novaera (G1), BRS Pujante (G2) e BRS Pajeú (G3) e com (600 mg.L^{-1}) e sem (0 mg.L^{-1}) silício (Si) via foliar (A) e a duas lâminas de irrigação (W-50 e W-100) (B). Catolé do Rocha, PB, 2022. Médias seguidas de mesma letra maiúscula (lâminas de irrigação) (A) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra minúscula (Cultivares) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Médias seguidas de mesma letra gregas (silício) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste F (B).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

5 CONCLUSÕES

O silício proporcionou atenuação do déficit hídrico com aumento no crescimento, no rendimento de grãos e no desenvolvimento nos genótipos de feijão-caupi.

Nos genótipos irrigados sem déficit hídrico ($E_t - 100\%$), o silício otimizou o aporte de massa seca total nos genótipos de feijão-caupi.

A lâmina de irrigação de 50% de evapotranspiração da cultura sem a aplicação de silício não é recomendada, pois reduziu o crescimento e o rendimento de grãos de plantas de feijão-caupi.

O genótipo BRS Pajeú expressou maior diâmetro caulinar, área foliar, massa seca da parte aérea e massa seca total, na lâmina de irrigação sem déficit hídrico com aplicação e sem aplicação de silício, promovendo uma melhor condutância estomática, correspondendo a um maior crescimento.

O genótipo BRS Novaera demonstrou o maior número de vagens secas por planta em todos os tipos de tratamentos avaliados (lâminas de irrigação e aplicação de silício), apresentando assim a maior produtividade de grãos tanto com aplicação de silício como sem a aplicação.

Os genótipos de feijão-caupi BRS Novaera, BRS Pujante e BRS Pajeú são indicados para o cultivo em regiões semiáridas.

REFERÊNCIAS

- AGBICODO, E.M.; FATOKUN, C.A.; MURANAKA, S.; VISSER, R.G.F.; LINDEN, C.G. Breeding drought tolerant cowpea: Constraints, accomplishments, and future prospects. **Euphytica**, v.167, n. 3, p.353–370, 2009.
- AGOSTINI, E. A. T.; MACHADO-NETO, N. B.; CUSTÓDIO, C. C. Induction of water deficit tolerance by cold shock and salicylic acid during germination in the common bean. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v.35, n.2, p. 209-219, 2013.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Guidelines for computing crop water requirements. **Rome: FAO**, v. 56, n. 2, p. 310, 1998.
- ALMEIDA NETO, V. E. de; OLIVEIRA, A. P. da S.; CAVALCANTE, I. E.; MELO, Y. L.; MELO, A. S. de. Ácido salicílico e metionina promovem a manutenção do status hídrico pelo ajustamento osmótico em feijão-caupi “BRS-Novaera”. **Perspectivas das Ciências Agrárias na Sociedade 5.0: Educação, Ciência, Tecnologia e Amor**. Recife. Editoria IIDV, p. 7, 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C. GONÇALVES, J. L. M.; G. SPAROVEK. Köppen’s climate classification map for Brasil. **Meteorologisch**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, J. M.; LIMA, A. S.; FIGUEIREDO, F. R. A.; SILVA, T. I.; CAVALCANTE, L. F.; MESQUITA, F. O.; MESQUITA, E. F.; SUASSUNA, C. F.; Chlorophyll a fluorescence and development of zucchini plants under nitrogen and silicon fertilization. **Agronomía Colombiana**. v. 38, n. 1, p. 57-65. 2020.
- ANDRADE JÚNIOR; A. S. de; RODRIGUES, B. H. N.; FRIZZONE, J. A.; CARDOSO, M. J.; BASTOS, E. A.; MELO, F. de B. Níveis de irrigação na cultura do feijão caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**. Campina Grande, v.6, n.1, p.17-20, 2002.
- ARAÚJO, E. D. de. Silício como atenuador do estresse hídrico em feijão-caupi por meio do mecanismo antioxidante e desempenho agrônômico. **Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba**. Campina Grande – PB, p. 102, março. 2017.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade da água na agricultura. **Estudos FAO: Irrigação e Drenagem**, Campina Grande, v. 29, n. 2, p. 153, 1999.
- BANDURSKA, H.; STROINSKI, A. The effect os salicylic on barley response to water deficit. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 27, n.3, p.379-386, 2005.
- BARBOSA, I.J.; SOUSA, H.C.; SCHNEIDER, F.; SOUSA, G.G.D.; LESSA, C. I.; SANÓ, L. Mulch with sugarcane bagasse and bamboo straw attenuates salt stress in cowpea cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, p. 485-491, 2021.

- BARROS, J.R.A.; GUIMARÃES, M.J.M.; SIMÕES, W.L.; MELO, N.F.D.; ANGELOTTI, F. Temperature: A major climatic determinant of cowpea production. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 45, e56812, 2023.
- BASTOS, E. A.; RAMOS, H. M. M.; ANDRADE-JUNIOR, A. S. de.; NASCIMENTO, F. N. do; CARDOSO, M. J. Parâmetros fisiológicos e produtividade de grãos verdes do feijão-caupi sob déficit hídrico. **Water Resources and Irrigation Management**, v.1, n.1, p.31-37, 2012.
- BASTOS, E. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; CARDOSO, M. J. Manejo da irrigação. In: do VALE, J. C.; BERTINI, C.; BORÉM, A. (Ed.) **Feijão-caupi: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: UFV, cap. 10, n. 5, p. 224-243, 2017.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 42 p.
- BESHARAT, S.B.; BARÃO, L.; CRUZ, C. New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management**, v. 263, n. 4, p. 1-9, 2020.
- BHERING, L.L. Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 17, n. 1, p. 187-190, 2017.
- BLANCO, F. F.; CARDOSO, M. J.; FREIRE FILHO, F. R.; VELOSO, M. E. C.; NOGUEIRA, C. C. P.; DIAS, N. S. Milho verde e feijão-caupi cultivados em consórcio sob diferentes lâminas de irrigação e doses de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 5, p. 524-530, 2011.
- BORTOLOTTI, R. **Resfriamento de sementes**. SeedNews, v. 11, n. 6, p. 16-17, 2005.
- BOSNIC, P.; BOSNIC, D.; JASNIC, J.; NIKOLIC, M. Silicon mediates sodium transport and partitioning in maize under moderate salt stress. **Environmental and experimental botany**, v. 155, p. 681-687, 2018.
- BOULTON, A. M.; DAVIES, K. F.; WARD, P. S. Species richness, abundance, and composition of ground-dwelling ants in northern California grasslands: role of plants, soil, and grazing. **Environmental entomology**, v. 34, n. 1, p. 96-104, 2005.
- BUHELDT, A. C.; TEIXEIRA, G. C. M.; OLIVEIRA, K. S.; ROCHA, A. M. S.; MELLO PRADO, R.; CAIONE, G. Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 1532-1548, 2020.
- ÇANAKÇI, S., MUNZUROĞLU, O. Effect of acetylsalicylic acid on germination, growth and chlorophyll amounts of cucumber (*Cucumis sativus* L.) **Seeds. Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 10, n. 17, p. 2930-2934, 2007.
- CANTUÁRIO, F.S.; LUZ, J.M.Q.; PEREIRA A.I.A.; SALOMÃO L.C.; REBOUÇAS, T.N.H. Podridão apical e escaldadura em frutos de pimentão submetidos a estresse hídrico e doses de silício. **Horticultura Brasileira**, v.32, n.2, p. 215-219, 2014.

CARVALHO, M.; CASTRO, I.; PEREIRA, J. M.; CORREIA, C.; CORTNES, M. R.; MATOS, M.; ROSA, E.; CARNIDE, V.; LINO-NETO, T. Evaluating stress responses in cowpea under drought stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 24, n. 2, p.1-13, 2019.

CASTRO, A. A. S.; DAMÁSIO, A. O.C.; MENEZES, F. S.; SOUZA, J. A.; SANTANA, F. S.; MENDONÇA, D.; FACCIOLI, G. G. Análise do impacto do uso de efluentes nas características do solo da cultura do feijão-caupi BRS Novaera (*Vigna unguiculata* L.walp.). **Agroforestalis News**, Aracaju, v.1, n.1, p. 41-47, 2016.

CHEN, D.; WANG, S.; YIN, L.; DENG, X. How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency?. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 281, 2018.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos - safra 2021/22**, Brasília, DF, v. 9, n. 12, 2022.

CRUSCIOL, C. A.; SORATTO, R. P.; CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, n. 2, p. 404-410, 2013.

CRUZ, C. S. A.; PEREIRA, E. R. L.; SILVA, L. M. M.; MEDEIROS, M. B.; GOMES, J. P. Repelência do *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: bruchidae) sobre grãos de feijão-caupi tratado com óleos vegetais. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 7, n. 3, p.01-05, 2012.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Seasonality of nutrients in leaves and fruits of apple trees. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 8, p. 493-501, 2006.

DUDDIGAN, S.; FRASER, T.; GREEN, I.; DIAZ, A.; SIZMUR, T.; TIBBETT, M. Plant, soil and faunal responses to a contrived pH gradient. **Plant and Soil**, v. 462, p. 505-524, 2021.

DUTRA, A. F.; MELO A. S. de; FILGUEIRAS, L.M.B.; SILVA. A. R. F.; OLIVEIRA I. M.; BRITO M.E.B. Parâmetros fisiológicos e componentes de produção de feijão-caupi cultivado sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.10, n.2, p.189-197, 2015.

ECHER, F. R.; CUSTÓDIO, C. C.; HOSSOMI, S. T.; DOMINATO, J. C.; MACHADO NETO, N. B. Estresse hídrico induzido por manitol em cultivares de algodão. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 4, p. 638-645, 2010.

EL-FOTOH, M.A.; EL- KADER, A.S.; MANSSUR, F.Y.O. Effect of irrigation intervals, antitranspirants, compost and humic acid on growth and yield of sweet potato. **Zagazig Journal of Agricultural Research**, v. 46, n.3, p.640- 660, 2019.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análises de solo. Centro Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, v. 2, rev. atual, p. 212, 1997. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf>. Acesso em: 10 outubro 2021.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. BRS Pajeú: Cultivar de feijão-caupi com grão mulato-claro. Teresina, PI: **Embrapa Meio-Norte**, não paginado. 1 folder. 2009. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/574657/brs-pajeu-cultivar-de-feijao-caupi-com-grao-mulato-claro>>. Acesso em: 27 setembro 2021.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: **Embrapa Solos**. v. 3, p. 353, 2018.

ENGLISH, M. Irrigation advisory services for optimum use of limited water. In: International Workshop on Irrigation Advisory Services And Participatory Extension In Irrigation Management, **Anais**. Montreal: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2002. Disponível em:<<http://www.fao.org/nr/water/docs/ias/paper23.pdf>>. Acesso em: 17 julho 2021.

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

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONSES, C.A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. Printed in the USA by Marcel Dekker, 1996.

FAROUK, S.; AMANY, A.R. Improving growth and yield of cowpea by foliar application of chitosan under water stress. **Egyptian Journal of Biology**, v. 14, p. 14-26, 2012.

FERNANDES, F. B. P.; LACERDA, C. F. D.; ANDRADE, E. M. D.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C. de. Efeito de manejos do solo no déficit hídrico, trocas gasosas e rendimento do feijão-de-corda no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 506-515, 2015.

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

FERREIRA, F.E.P.; SILVA, V.D.P.R.; SILVA, M.T.; DANTAS, S.M. Cowpea Yield Under Water Stress Scenarios. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 46, p. 1 – 12, 2023.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: Editora da UPF. 2004.

FRANCHINI, J.C.; GONZALEZ-VILA, F.J.; CABRERA, F.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. Rapid transformations of plant water soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid Oxisol. **Plant and Soil**, v.231, p.55-63, 2001.

FREIRE FILHO, F.R.; LIMA, J. A. A.;RIBEIRO, V.Q. **Feijão-Caupi: Avanços tecnológicos**(1st ed.). Embrapa Informação Tecnológica. 2005.

FREIRE FILHO, F.R.; RAPOSO, J. A.A.; COSTA, A. D.; ROCHA, M.D.M.; RIBEIRO, V.Q., SILVA, K.J.D.; GONÇALVES, J.R.P. BRS Pajeú: Cultivar de feijão-caupi com grão mulato claro. Teresina: **Embrapa Meio-Norte**, 2008a. (Folder).

FREIRE FILHO, F. R.; CRAVO, M. da S.; VILARINHO, A. A.; CAVALCANTE, E. da S.; FERNANDES, J. B.; SAGRILO, E.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. de M.; SOUZA, F. de F.; LOPES, A de M.; GONÇALVES, J. R. P.; CARVALHO, H. W. L. de; RAPOSO, J. A. A.; SAMPAIO, L. S. BRS Novaera: Cultivar de feijão-caupi de porte semi-ereto. **Embrapa Amazônia Oriental-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, p. 4, 2008b.

FREIRE FILHO, F. R. Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios. **Embrapa Meio-Norte-Livro científico (ALICE)**, p. 84, 2011.

FREITAS, C. A. S. de; BEZERRA, F. M., SILVA, A. R. da; PEREIRA FILHO, J. V.; FEITOSA, D. R. Comportamento de cultivares de mamona em níveis de irrigação por gotejamento em Pentecoste, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 10, p. 1059-1066, 2010.

FREITAS, R. M. O. D.; TORRES, S. B.; NOGUEIRA, N.W.; LEAL, C.C.P.; FARIAS, R.M.D. Produção e qualidade de sementes de feijão-caupi em função de sistemas de plantio e estresse hídrico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, p. 370-376, 2013.

FREITAS, R.; DOMBROSKI, J. L. de, FREITAS, F. C. L. de, NOGUEIRA, N. W.; PINTO, J. R. da S. Physiological responses of cowpea under water stress and rewatering in no-tillage and conventional tillage systems. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 3, p. 559-567, 2017.

GIACOMINI, S.J.; AITA, C.; HÜBNER, A.P.; LUNKES, A.; GUIDINI, E.; AMARAL, E.B. do. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p.1097-1104, 2003.

GNANKAMBARY, K.; SAWADOGO, N.; DIÉNI, Z.; BATIENO, T.B.J.; TIGNEGRÉ, J. B. D. S.; SAWADOGO, M.; OUÉDRAOGO, T.J. Assessment of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) mutant lines for drought tolerance. **International Journal of Agronomy**, v. 2020, p. 1-9, 2020.

GOMIDE, R. L.; MAENO, P. Requerimento de água pelas culturas. Uso e manejo de irrigação. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**, p. 225-253, 2008.

GONÇALVES, F. V. L. O.; MEDICI, M. P. S.; FONSECA, C.; PIMENTEL, S. A.; AZEVEDO, R. A. Protein, phytate and minerals in grains of commercial cowpea genotypes. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n.1, p. 16, 2020.

GUIMARÃES JÚNIOR, M.P.A.; SANTOS, A.C; ARAÚJO, A.S.; OLIVEIRA, L.B.T.; RODRIGUES, M.O.D.; MARTINS, A.D. Relação Ca:Mg do corretivo da acidez do solo e as características agronômicas de plantas forrageiras. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.14, n.3, p.460-471, 2013.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J.D. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 1, p. 201–213, 2012.

HALL, A.E., CISSE, N.; THIAW, S.; ELAWAD, H.; EHLERS, J.D.; ISMAIL, A.M.; FERY, R.; ROBERTS, P.A.; KITCH, L.W.; MURDOCK, L.L.; BOUKAR, O.; PHILLIPS, R.D.;

MCWATTERS, K.H. Development of cowpea cultivars and germplasm by the cean/cowpea CRSP. **Field Crops Research**, v.82, n. 2-3, p.103–134, 2003.

HAYATU, M.; MUHAMMAD, S. Y.; ABDU, H.U. Effect of water stress on the leaf relative water content and yield of some cowpea (*Vigna unguiculata* (L) Walp.) genotype. **International Journal of Scientific & Technology Research**, v. 3, n.7, 2014.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2023. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618#resultado>> Acesso em 12 de abr. de 2023.

IHUOMA, S. O.; MADRAMOOTOO, C. A. Recent advances in crop water stress detection. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 141, n. 1, p. 267-275, 2017.

IPA-Instituto Agrônomo de Pernambuco. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco**. Recife, v. 3, n. 3, p. 212, 2008.

JACINTO JUNIOR, S.G.J.; LUCENA, E.M.P. Alterações morfofisiológicas e metabólitos secundários produzidos por feijoeiros submetidos ao estresse hídrico: uma revisão integrativa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e445111436506-e445111436506, 2022.

JAYAWARDHANE, J.; GOYALI, J.C.; ZAFARI, S.; IGAMBERDIEV, A.U. The Response of Cowpea (*Vigna unguiculata*) Plants to Three Abiotic Stresses Applied with Increasing Intensity: Hypoxia, Salinity, and Water Deficit. **Metabolites**, v. 12, n 38, p. 1-16, 2022.

KEBEDE, E.; BEKEKO, Z. Expounding the production and importance of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in Ethiopia. **Cogent Food & Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 1769805, 2020.

KORNDORFER G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Silicato de cálcio e magnésio na agricultura. Uberlândia: UFU/ICIAG, (GPSi-ICIG-UFU). **Boletim Técnico**, v. 1, n. 1, p. 3, 2002.

KORNDÖRFER, G.; SOUZA, S. R. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. de; SANTOS, L. A. **Nutrição Mineral de Plantas**, cap. 15, p. 563-599, 2018.

LANA, R. M. Q.; KORNDÖRFER, G. H., ZANÃO JÚNIOR, L. A., SILVA, A. F.; LANA, A. M. Q. Efeito do silicato de cálcio sobre a produtividade e acumulação de silício no tomateiro. **Bioscience Journal**, v. 19, n. 2, p. 15-20, 2003.

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

LIMA, J. R. S. Balanço hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para as condições do Brejo Paraibano. **Tese** (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, p. 167, 2004.

LIMA FILHO, O. F. de. O silício em sistemas intensivos de produção agropecuária. **Embrapa Agropecuária Oeste-Documentos (INFOTECA-E)**, p. 9, 2006.

LOIOLA, A. T.; SÁ, F. V. D. S.; FERREIRA NETO, M.; TORRES, S. B.; PRAXEDES, S. S. C.; REGES, L. B. L.; ALVES, T. R. C. Phenology and production of traditional seeds of cowpea irrigated with saline water. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, e20217962, 2022.

LUCAS, R.W.; KLAMINDER, J.; FUTTER, M.N.; BISHOP, K. H.; EGNELL, G.; LAUDON, H.; HÖGBERG, P. meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: implications for plants, soils, and streams. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 2, p. 95-104, 2011.

LUZ, M. D. S.; FERREIRA, G. B.; BEZERRA, J. R **Adubação e correção do solo: procedimentos a serem adotados em função dos resultados da análise do solo**. Embrapa: Brasília, circular técnico 63, 32 p, 2002.

MAGALHÃES, I.D.P.B.; SEDIYAMA, M.A.N.; SILVA, F.D.B.D.; VIDIGAL, S.M.; PINTO, C.L.O.; LOPES, I.P.C. Produtividade e exportação de nutrientes em feijão-vagem adubado com esterco de galinha. **Revista Ceres**, v. 64, p. 98-107, 2017.

MALAVOLTA, E.A. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Ceres, p.251, 1980.

MALAVOLTA, E., VITTI, G. C. & OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira da Potassa e do Fosfato. 1997.

MALI, MANJU; AERY,; NARESH, C. Silicon effects on nodule growth, dry-matter production, and mineral nutrition of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 6, p. 835-840, 2008.

MARINI, P.; MORAES, C. L.; MARINI, N.; MORAES, D. M.; AMARANTE, L. Alterações fisiológicas e bioquímicas em sementes de arroz submetidas ao estresse térmico. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n. 4, p. 722-730, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902012000400014>.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London, Academic Press, p.889, 1995.

MAUAD, M.; CRUSCIOLE, A.C.; NASCENTE, A.S.; GRASSI FILHO, H.; LIMA. G.P.P. Effects of silicon and drought stress on biochemical characteristics of leaves of upland rice cultivars. **Revista Ciência Agronômica**. v. 47. n. 3. p. 532-539. 2016.

MELO, A. S. de; SILVA, A. R. F.; DUTRA, A. F.; DUTRA, W. F.; BRITO, M. E. B.; SA, F. V. da S. Photosynthetic efficiency and production of cowpea cultivars under deficit irrigation. **Revista Ambiente e Água**, v. 13, n. 5, p. 8, 2018.

MELO, A.S.; MELO, Y.L.; LACERDA, C.F.; VIÉGAS, P.R.A.; FERRAZ, R.L.S.; GHEYI, H.R. Water restriction in cowpea plants [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]: Metabolic changes and tolerance induction. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.26, n.3, p.190-197, 2022

MENDES, R. M. D. S.; TÁVORA, F. J. A. F.; PITOMBEIRA, J. B.; NOGUEIRA, R. J. M.C. Relações fonte-dreno em feijão-de-corda submetido à deficiência hídrica. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 1, p. 95-103, 2007.

MENEGALE, M. L. C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 4, n.1, p. 435-454, 2015.

MESQUITA, E. F.; MESQUITA, E.O. ; SOUSA, C. S. ; FERREIRA, D. S. ; ROCHA, J. L. A.; CAVALCANTE, L. F. . Water stress mitigation by silicon in sweet-potato. **Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais**, v. 12, p. 01-12, 2021.

MINAMI, K.; SALVADOR, E.D. **Substrato para plantas**. Piracicaba, SP: Degaspari. 2010.

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

MOURA, J. Z.; PADUA, L. E. M.; MOURA, S. G.; TORRES, J. S.; RAMALHO E SILVA, P. R. Escala de desenvolvimento fenológico e exigência térmica associada a graus-dia do feijão-caupi. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 3, p. 66-71, 2012.

MOUSA, K. M.; METWALY, M. M.; ALSHEHRI, M. A.; SAYED, S. M.; RAKHA, O. M. Soil pH alters the biological parameters of cowpea aphid *Aphis craccivora* Koch (Hemiptera: Aphididae) on its host plant *Vicia faba*. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 4, p. 2926-2932, 2022

MOUSAVI, S. A. et al. Integrated application of biochar and bio-fertilizer improves yield and yield components of cowpea under water-deficient stress. **Italian Journal of Agronomy**, v. 15, n. 2, p. 94-101, 2020.

MOUSINHO, F. E. P.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; FRIZZONE, J. A. Viabilidade econômica do cultivo irrigado do feijão-caupi no Estado do Piauí. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 1, p. 139-145, 2008.

MULOVHEDZI, N.E.; ARAYA, N.A.; MENGISTU, M.G.; FESSEHAZION, M.K.; POOY, C.P.; ARAYA, H.T.; LAAN, M, V. Estimating evapotranspiration and determining crop coefficients of irrigated sweet potato (*Ipomoea batatas*) grown in a semi-arid climate. **Agricultural Water Management**, v. 233, n. 3 p. 1-9, 2020.

MUCHERO, W.; EHLERS, J. D.; CLOSE, T. J.; ROBERTS, P. A. Mapping QTL for drought stress-induced premature senescence and maturity in cowpea. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 118, n. 5, p. 849-863, 2009.

MUKARRAM, M. et al. Silicon nanoparticles in higher plants: Uptake, action, stress tolerance, and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. **Environmental Pollution**, p. 119855, 2022.

MUNJONJI, L.; AYISI, K.K. Leaf gas exchange and $\delta^{13}\text{C}$ in cowpea and triticale under water stress and well-watered conditions. **Heliyon**, v 7, p. 1-6, 2021

NASCIMENTO, J.T.; PEDROSA, M. B.; TAVARES SOBRINHO, J. Efeito da variação de níveis de água disponível no solo sobre o crescimento e produção de feijão-caupi, vagens e grãos verdes. **Horticultura Brasileira**, v.22, n.2, p.174-177, 2004.

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

NATALE, W.; PRADO, R.M.; ROZANE, D.E.; ROMUALDO, L.M. Efeitos da calagem na fertilidade do solo e na nutrição e produtividade da goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n.1, p. 1475-1485, 2007.

NEU, S.; SCHALLER, J.; DUDEL, E. Gert. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 40829, 2017.

NÓBREGA, J.Q.; RAO, T.V.R.; BELTRÃO, N.E. de M.; FIDELIS FILHO, J. Análise de crescimento do feijoeiro submetido a quatro níveis de umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.437- 443, 2001.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; ALBUQUERQUE, M. B.; SILVA, E. C. Aspectos Ecofisiológicos da tolerância à seca em plantas da caatinga. In: NOGUEIRA, R. J. M. C.; ARAÚJO, E. L.; WILLADINO, L. G.; CAVALCANTE, U. M. T. Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas. Recife: UFRPE, **Imprensa Universitária**, p. 22-31, 2005.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.T. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, p. 399, 1999.

OLIVEIRA, A. D.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Engenharia Agrícola**, v.25,n. 1, p.86-95, 2005.

OLIVEIRA, R. A.; TAGLIAFERRE, C.; SEDIYAMA, G. C.; MATERAM, F. J. V.; CECON; P. R. Desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.12, n.2, p.166–173, 2008.

OLIVEIRA, L. J. da; SILVA, S. M. da; COSTA NETTO, A. P.; SILVA, S. M. da; SILVA, F. M. de S. M. da. Características agronômicas e atividade da redutase do nitrato em plantas de *Campomanesia* sp. sob estresse hídrico. **Revista Agrarian**, v. 4, n. 11, p. 43-53, 2011.

OLIVEIRA, D.; PEIXOTO, C.P.; VIEIRA, E.L.; OLIVEIRA, S.M.R.; MACHADO, G.S.; PEIXOTO, M.F.P. Índices fisiológicos de mudas de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) provenientes de sementes pré-embebidas em stimulate®. Enciclopédia Biosfera, **Centro Científico Conhecer**, v. 7, n.13, p. 1833-1846, 2011

OLIVEIRA, M. G. C.; OLIVEIRA, L. F. C.; WENDLAND, A.; GUIMARÃES, C. M.; QUINTELA, E. D.; BARBOSA, F. R.; CARVALHO, M. C. S.; LOBO JUNIOR, M.; SILVEIRA, P. M. Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos. **Embrapa Arroz e Feijão-Livro técnico (INFOTECA-E)**, v. 2, rev.ampl., p. 61, 2018.

OLIVEIRA, F.S.; SARMENTO, E.C.S.; DOMBROSKI, J.L.D.; SILVA, D.V.; FREITAS, C.D.M., SOUZA, M. F.; SILVEIRA, L.M. Accumulation of macronutrients in cowpea and weeds in competition and under soil water deficit. **Bioscience Journal**, v. 35, n. 6, p. 1747-1757, 2019.

OLIVEIRA, A.P.S. Ácido salicílico e metionina mitigam os efeitos deletérios da restrição hídrica em feijão-caupi. 87 f. **Dissertação** (Mestre em Ciências Agrárias) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2020

OLORUNWA, O.J.; ADHIKARI, B., SHI, A.; BARICKMAN, T.C. Screening of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) genotypes for waterlogging tolerance using morpho-physiological traits at early growth stage. **Plant Science**, v. 315, p. 111136, 2022.

PARRY, MAURÍCIO M.; DO SA KATO, MARIA; DE CARVALHO, JANICE, G. Macronutrientes em caupi cultivado sob duas doses de fósforo em diferentes épocas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v.12, n.3, p.236–242, 2008.

PEIXOTO, C. P. **Curso de Fisiologia Vegetal**. Cruz das Almas: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, v. 177, p. 218, 2011.

PEREIRA, T.S., PEREIRA, T.S., SOUZA, C.L.F.D.; LIMA, E.J.A.; LOBATO, A.K.S. Silicon deposition in roots minimizes the cadmium accumulation and oxidative stress in leaves of cowpea plants. **Physiol Mol Biol Plants**, v. 24, p. 99–114, 2018.

PEREZ, A.A.G.; SORATTO, R. P.; MANZATTO, N.P.; SOUZA, E. D. F.C D. Extração e exportação de nutrientes pelo feijoeiro adubado com nitrogênio, em diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1276-1287, 2013.

PESSOA, J. L.; FREIRE, A. L. O.; COSTA, A. S. Trocas gasosas de plantas de *Handroanthusimpetiginosus* (Mart. ex DC) Mattos submetidas ao déficit hídrico e posterior reidratação. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.16, n.3, p. 269-276, 2017.

POZZA, A. A. A.; ALVES, E.; POZZA, E. A.; CARVALHO, J. G.; MONTANARI, M.; GUIMARÃES, P. T. G.; SANTOS, D. M. Efeito do silício no controle da cercosporiose em três variedades de cafeeiro. **Fitopatologia Brasileira**, v. 29, n. 5, p. 185-188, 2004.

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. **Guia de interpretações de análise de solo e foliar**. 2013.

RAMOS, H. M. M.; BASTOS, E. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; MAROUELLI, W. A.; Estratégias ótimas de irrigação do feijão-caupi para produção de grãos verdes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 576-583, 2012.

RAMOS, D. D. et al. Decomposição de Diferentes Espécies de Leguminosas. **Cadernos de Agroecologia**, v. 13, n. 2, p. 1-8, 2018.

RAMOS, F. T.; DORES, E.F.D.C.; WEBER, O.L.D.S.; BEBER, D.C.; CAMPELO JR, J. H.;MAIA, J.C.D.S. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil

under no-till farming in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 9, p. 3595-3602, 2018.

RASTOGI, A.; YADAV, S.; HUSSAIN, S.; KATARIA, S.; HAJIHASHEMI, S.; KUMARI, P.; YANG, X.; BRESTIC, M. Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants?. **Plant Physiology and Biochemistry**. V. 169. p. 40-48. 2021

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. S. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p. 359 , 1999.

RICHARDS, L. A. **Diagnóstico e melhoramento de solos salinos e alcalinos**. LWW, 1954.

RICHARDS, L. A. Diagnóstico y rehabilitación de Suelos salinos y sodicos. Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América, **Manual de Agricultura** Núm. 60, 1970. 172 p.

RITTE, I.P.; EGNIN, M.; IDEHEN, O.; MORTLEY, D.; BERNARD, G.C.; BINAGWA, P. H.; BONSI, C.K. Evaluation of Cowpea Morpho-physiological and Yield Responses to Vegetative and Pre-Anthesis Water-Deficit Stress Tolerance under Greenhouse Conditions. **European Journal of Applied Sciences**–Vol, v. 10, n. 2, 2022

RIVAS, R.; FALCÃO, H. M.; RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C.; PIMENTEL, C.; SANTOS, M. G. Drought tolerance in cowpea species is driven by less sensitivity of leaf gas exchange to water deficit and rapid recovery of photosynthesis after rehydration. **South African Journal of Botany**, v.103, n. 6, p. 101-107, 2016.

SÁ, F.V.S.; NETO FERREIRA, M.; LIMAA, Y.B.; PAIVA, E.P.; SILVA, A.C.; DIAS, N.S.; SOUZA, F.M.; MELO, A.S.; MOREIRA, C.L.; SILVA, L.A. Phytomass accumulation and mineral composition of cowpea ('Vigna unguiculata') under salt stress and phosphate fertilization. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 7, p. 1149-1154, 2019.

SÁ, F.V.D.S.; SILVA, I. E. D.; FERREIRA NETO, M.; LIMA, Y.BD.; PAIVA, E.P.D.; GHEYI, H.R. Phosphorus doses alter the ionic homeostasis of cowpea irrigated with saline water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, p. 372-379, 2021.

SAMPAIO, E.G.; ALMEIDA, F.A.; OLIVEIRA, A.; FONSECA, W.L.; TIBURTINO LEITE, M. L. T.; SILVA XAVIER, L.M.S. Control of Meloidogyne javanica in cowpea with silicon application. **Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 17, n. 3, 2022.

SANTIAGO, F. E. M.; AGUIAR SANTIAGO, F. L.; LUSTOSA FILHO, J. F.; RATKE, R. F. Plant growth and symptomatology of macronutrient deficiencies in cowpea plants. **Comunicata Scientiae**, v. 9, n. 3, p. 503-508, 2018.

SANTOS, C.A.; SILVA NETO, M.F.; BEZERRA, J.C. **Feijão-caupi BRS Pujante: cultivar para áreas irrigadas e de sequeiro do vale do São Francisco**. Petrolina: Embrapa semiárido, 4 p. 2007. (Folder).

SANTOS, C. A. F.; BARROS, G. A. de A.; SANTOS, I. C. N.; FERRAZ, M. G. de S. Comportamento agrônomico e qualidade culinária de grãos de linhagens de feijão-caupi

avaliadas no Vale do São Francisco. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 26, n. 3, p. 404-408, 2008.

SANTOS, L.C.; SILVA, G.A.M.; OLIVEIRA, M.A.; ROCHA, J.L.A.; ARAÚJO SILVA, S.T., RIBEIRO, M.D.S.; SOUSA, F.Q. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e3810716247-e3810716247, 2021.

SANTOS, A.R.; MELO, Y.L.; OLIVEIRA, L.F.; CAVALCANTE, I.E.; FERRAZ, R. L. S.; SÁ, F.V.S.; LACERDA, C.F.; DE MELO, A. S. Exogenous Silicon and Proline Modulate Osmoprotection and Antioxidant Activity in Cowpea Under Drought Stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, V. 22, n. 2, p. 1692–1699, 2022.

SAVVAS, D.; NTATSI, G. Biostimulant activity of silicon in horticulture. **Scientia Horticulturae**, v. 196, n. 12, p. 66-81, 2015.

SELLSCHOP, J. P. F. Cowpeas, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. In: **Field Crops Abstract**. v. 15, n. 3, p. 259-266, 1962.

SENARATNA, T.; TOUCHELL, D.; BUNN, E.; DIXON, K. Acetyl salicylic acid (aspirin) and salicylic acid induce multiple stress tolerance in bean and tomato plants. **Plant Growth Regulation**, v. 30, n. 2, p. 157-161, 2000.

SHAMSHIPOURI, M.; MOTESHAREDEH, B.; RAHMANI, A.; ALIKHANI, H.A.; ETSAMI, H. Optimal Concentrations of Silicon Enhance the Growth of Soybean (*Glycine Max* L.) Cultivars by Improving Nodulation, Root System Architecture, and Soil Biological Properties. **Silicon**, v. 14, p. 5333–5345, 2022.

SHARAFIZAD, M.; NADERI, A.; SIADAT, S. A.; SAKINEJAD, T.; LAK, S. Effect of salicylic acid pretreatment on germination of wheat under drought stress. **Journal of Agricultural Science**, v.5, n.3, p.179-199, 2013.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; HAN, W.; HU, T.; GUO, J.; GONG, H. Silicon Enhances Water Stress Tolerance by Improving Root Hydraulic Conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1-15, 2016

SILVA, S.A.; COOK, H.F. Soil physical conditions and physiological performance of cowpea following organic matter amelioration of sandy substrates. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 34, n. 7-8, p. 1039-1058, 2003.

SILVA, C. R. da; ALVES JÚNIOR, J.; SILVA, T. J. A. da; FOLEGATTI, M. V.; CAMPECHE, L. F. de. S. M. Variação sazonal na evapotranspiração de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’. **Irriga**, Botucatu, v.11, n.1, p.26-35, 2006.

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

SILVA, T. C. F. S.; MATIAS, J. R.; RAMOS, D. L. D.; ARAGÃO, C. A.; DANTAS, B. F. Uso de diferentes concentrações de ácido salicílico na germinação de sementes de melancia Crimson Sweet. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 7679-7685, 2012.

SILVA, G.C.; MAGALHÃES, R.C.; SOBREIRA, A. C.; SCHIMITZ, R.; SILVA, L.C. Rendimento de grãos secos e componentes de produção de genótipos de feijão-caupi em cultivo irrigado e de sequeiro. **Revista Agro@mbiente**, v. 10, n. 4, p. 342-350, 2016.

SILVA, C.S.; MELO, A.S.; MELO, Y.L.; ANDRADE, W.L.; LIMA, L.M.; SANTOS, A.R. Silicon foliar application attenuates the effects of water suppression on cowpea cultivars. **Ciência e Agrotecnologia**, V. 43, p. 1-10, 2019.

SILVA, A. L. et al. Desempenho agrônômico de feijão-caupi de porte semiereto e semiprostrado em diferentes populações. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 10, n. 1, p. 193-198, 2020.

SILVA, D. C. et al. Silicon foliar application attenuates the effects of water suppression on cowpea cultivars. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, 2020.

SIMEÃO, M.; OLIVEIRA, A.E.de S.; SANTOS, A.R.B.; MOUSINHO, F. E. P.; RIBEIRO, A.A. Determinação da ETc e Kc para o feijão – fava (*Phaseolus lunatus* L.) na região de Teresina, Piauí. **Revista Verde**, v. 8, n. 2, p. 291 - 296, 2016.

SINGELS, A.; DONALDSON, R. A.; SMIT, M. A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 291-303, 2005.

SOARES, L.A.S.; MEDEIROS, T.L.F.; COLMAN, V.C.G.; PALMEIRA; I.V.S, SILVA, I. J.; MOREIRA, R. C. L. Estratégias de irrigação com déficit hídrico nos estádios fenológicos do feijão-caupi sob adubação potássica. **Irriga**, v. 26, n. 1, p. 111-122, 2021.

SOBRAL, L.F.; BARETTO, M.C.; SILVA, A.J.; ANJOS, J.L. **Guia prático para interpretação de resultados de Análises de solo. Embrapa Tabuleiros Costeiros: Aracaju**, (Documentos 206), 2015.

SOUSA, M. A. de; LIMA, M. D. B.; SILVA, M. V. V. da; ANDRADE, J. W. de S. Estresse hídrico e profundidade de incorporação do adubo afetando os componentes de rendimento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 2, p. 175-182, 2009.

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

SOUZA, T. M. A. de; SOUZA, T. A.; SOUTO, L. S.; SÁ, F. V. S.; PAIVA, E. P.; MESQUITA, E. F. de. Água disponível e cobertura do solo sob o crescimento inicial do feijão-caupi cv. BRS Pujante. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.10, n. 3, p.598-604, 2016.

SOUZA, S.F.; RIBEIRO, V.G. Yellow passion-fruit irrigated in diferent cropping systems. **Revista Brasileira Fruticultura**, v. 38, n. 3, p. 1-11, 2016.

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

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre-RS: Artmed. 6. ed.. 888 p.. 2017.

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., & TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**, 2017.

TEMIZ, C. C.; TÉLLEZ, L. I.; TREJO, V. J.; MERINO, F. C. G. Efecto de los elementos benéficos Al, Co, Se y Si en la nutrición de heliconias (*Heliconia sp.*). **Agro Productividad**, v. 10, n. 3, p. 62-68, 2017.

TEODORO, P. E.; RIBEIRO, L. P.; OLIVEIRA, E. P.; CORREA, C. C.; TORRES, F. E. Acúmulo de massa seca na soja em resposta à aplicação foliar com silício sob condições de déficit hídrico. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 1, p. 161-170, 2015.

TETTEH, R.; BOATENG, S.K.; ASAMOAH, K. Preliminary Evaluation of Growth Response of Two Cowpea Accessions to Water Stress. **Agricultural Science Digest**. v. 40, n.1, p. 44-48, 2020.

TORRES, F. E.; TEODORO, P. E.; SAGRILO, E.; CECCON, G.; CORREA, A. M. Interação genótipo x ambiente em genótipos de feijão-caupi semiprostrado via modelos mistos. **Bragantia**, v. 74, n. 3, p.255-260, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0099>.

TURCO, J. E. P., RIZZATTI, G. S.; PAVANI, L. C. Custo de energia elétrica em cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, afetado pelo manejo da irrigação e sistemas de cultivo. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 2, p. 311-320, 2009.

VERA, G.D.S.; CRUZ, G.D.S.; de SOUZA, H.A.; SILVA, K.; BEZERRA, A.D.C. Acúmulo e marcha de absorção de macronutrientes no feijão-caupi em sistema de cultivo mínimo. In: Congresso nacional de feijão-caupi, 5. Fortaleza. Sustentabilidade e inovações tecnológicas para o feijão-caupi: desafios e perspectivas: **anais...** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará: Embrapa Meio-Norte, 2019.

VOLF, M. R. et al. Efeito da adubação potássica em solo arenoso sobre o teor de nutrientes essenciais nas folhas de soja. **Anais de Ciências Agrícolas** , v. 67, n. 1, pág. 99-106, 2022.

WHALEN, J.K.; CHANG, C. Phosphorus sorption capacities of calcareous soils receiving cattle manure applications for 25 years. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.33, v.1011-1026, 2002.

YAN, G.C.; NIKOLIC, M.; YE, M.J.; XIAO, Z. X.; LIANG, Y.C. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 10, p. 2138-2150, 2021.

YAVAS, I.; KESER, B. The Effect of Silicon and The Status of Phenolic Compounds On The Germination of Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) Under Temperature Stress. **ISPEC Tarım Bilimleri Dergisi**, v.5, n. 4, p. 870-880, 2021.

YOUYONGWENCH, S.; SAMPHUMPHUANG, T.; TISARUM, R.; THEERAWITAYA, C.; CHA-UM, S. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved water deficit tolerance in

two different sweet potato genotypes involves osmotic adjustments via soluble sugar and free proline. **Scientia Horticulturae**, v. 198, n. 2, p. 107-117, 2016.

ZANETTI, L.V.; MILANEZ, C.R.D.; GAMA, V.N.; AGUILAR, M.A.G.; SOUZA, C.A.S.; TRINI, E. C.; FERRAZ, T.M.; FIGUEIREDO, F.A.M.M. de A. Leaf application of silicon in young cacao plants subjected to water deficit. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51,n.3,p.215-223, 2016.

ZHANG, W.; XIE, Z.; LANG, D.; CUI, J.; ZHANG, X. Beneficial effects of silicon on abiotic stress tolerance in legumes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 15, p. 2224-2236, 2017.

ZHANG, Y.; SHI, Y.; GONG, H.; ZHAO, H.; HU, Y.; WANG, Y. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 10, p. 2151-2159, 2018.

ZYADA, H.G.; IBRAHEIM, S.K.A.; EL-SAADONY, F. M.; MOHASEB, M.I Response of growth and productivity of cowpea plants to nano mixture of micronutrients under different potassium sulphate fertilizer rates. **Journal of Bio-agriculture**, p. 1-14, 2021.