

APLICAÇÃO DE SILÍCIO COMO ESTRATÉGIA ATENUANTE AO ESTRESSE SALINO NO CULTIVO DE ALFACE HIDROPÔNICO

Carlos Almi Nogueira Gomes¹, Everton Alencar Patricio², Carlos Wagner Oliveira³, Ana Célia Maia Meireles³, Carolina da Silva de Oliveira⁴, Jaqueline de Melo Santos Silva⁴

RESUMO: O estresse salino limita a produção das culturas e inviabiliza a produção de espécies mais sensíveis ao excesso de sais, tais como a alface. É importante desenvolver e aprimorar estratégias agrícolas que possibilitem os cultivos bioassalinos, visando a segurança alimentícia da população. Nesse contexto, o objetivou-se avaliar o desempenho hídrico e produtivo da alface hidropônica em função de níveis de salinidade e aplicação foliar de silício. O experimento foi conduzido em ambiente protegido no Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), da Universidade Federal do Cariri (UFCA). O delineamento experimental foi em blocos casualizados com parcela subdivida em esquema fatorial de 4 x 2, sendo quatro níveis de salinidade da solução nutritiva (1,5; 2,5; 3,5 e 4,5 dS m⁻¹) com e sem a aplicação de silício (0,0 e 6,0 mM), com 4 repetições. Foram avaliados os aspectos hídricos e de produção de biomassa das plantas. O teor de água nas raízes, apresentou tendência crescente com a intensificação do estresse salino, o que configura um mecanismo de adaptação. Estudos futuros são necessários para analisar concentrações diferentes de silício e os possíveis efeitos nas plantas sobre estresse salino.

PALAVRAS-CHAVE: Ácido salicílico, produção de biomassa, cultivo bioassalino.

APPLICATION OF SILICON AS A STRATEGY TO MITIGATE SALINE STRESS IN HYDROPONIC LETTUCE CULTIVATION

ABSTRACT: Saline stress limits crop production and makes it impossible to produce species that are more sensitive to excess salts, such as lettuce. It is important to develop and improve

¹ Discente de Agronomia e Bolsista FUNCAP, CCAB/UFCA, 63100001, Crato-CE,

² Bolsista CNPq, Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade, Universidade Federal do Cariri, CEP: 63130-025, Crato, CE, everton.alencar@aluno.ufca.edu.br,

³ Docentes do curso de Agronomia, CCAB/UFCA, Crato-CE,

⁴ Discente de Agronomia, CCAB/UFCA, Crato, CE.

agricultural strategies that enable biosaline crops, aiming at food security for the population. In this context, the objective was to evaluate the water and productive performance of hydroponic lettuce as a function of salinity levels and foliar application of silicon. The experiment was conducted in a protected environment at the Center for Agricultural Sciences and Biodiversity (CCAB) of the Federal University of Cariri (UFCA). The experimental design was randomized blocks with a split plot in a 4 x 2 factorial scheme, with four levels of salinity of the nutrient solution (1.5, 2.5, 3.5 and 4.5 dS m⁻¹) with and without the application of silicon (0.0 and 6.0 mM), with 4 replicates. The water and biomass production aspects of the plants were evaluated. The water content in the roots showed an increasing trend with the intensification of saline stress, which constitutes an adaptation mechanism. Future studies are needed to analyze different silicon concentrations and the possible effects on plants under saline stress.

KEYWORDS: Salicylic acid, biomass production, biosaline cultivation.

INTRODUÇÃO

No contexto global há uma problemática voltada para a insegurança alimentar, isso porque as classes menos favorecidas da sociedade não possuem o devido acesso a uma alimentação saudável e equilibrada, intensificado ao fato do crescimento populacional ser um agravante da situação, gerando um aumento exacerbado nos números de consumo de alimentos, expansão das cidades e nas restrições no uso das terras (Saath, et al., 2018). Nesse cenário, a região semiárida brasileira se vê cada vez mais evidente, visto que é caracterizada por longos períodos de seca e má distribuição pluviométrica, possui um dado alarmante de 68% de insegurança alimentar que abrange a população dessa região (Galvão, 2024).

Este fato contribui para um balanço hídrico desfavorável, onde a precipitação inferior a 800 mm distribuídas e de forma irregular, afeta diretamente a sobrevivência das famílias a base da produção agrícola (Lemos, 2020). A presença de um substrato cristalino nessa região promove a ocorrência natural de processo de salinização tanto do solo como da água, que é potencializado em regiões semiáridas devido a razões climáticas, resultando em águas com altas concentrações de sais solúveis, que muitas vezes são as únicas fontes de água para irrigação (Velooso et al., 2022; Silva et al., 2024). A utilização de água na agricultura corresponde a 70% do consumo global, crescendo de maneira exponencial e impactando diretamente no aumento da degradação da qualidade do conteúdo hídrico das bacias hidrográficas (Gama et al., 2023; Demartelaere et al., 2020)

Nessa circunstância o cultivo hidropônico surge como um meio alternativo dos métodos tradicionais de produção, trazendo consigo vantagens significativas, entre elas as que mais se destacam pelo baixo consumo de água, elevada produtividade, redução no ciclo de produção, e também a diminuição da perda de nutrientes em relação ao cultivo do solo (Lavaria et al., 2020). A utilização de água de baixa qualidade para compor o uso de soluções nutritivas na hidroponia tem sido explorada para a cultura da alface (*Lactuca sativa* L.), em que é considerada uma hortaliça sensível ou relativamente sensível ao sal (KHALIFA et al., 2016; PAULUS et al., 2012; SENA et al., 2023). Como forma de desenvolver possibilidades de produção em condições adversas, o uso do silício (Si) surge para atenuar situações de estresses, incluindo a salinidade.

Alguns estudos mostram que sua presença tem sido benéfica para as plantas em alívios de estresse abióticos, na qual promove o mecanismo de adaptação ao estresse nos quesitos de aumento do crescimento de biomassa, manutenção da rigidez estrutural, manejo de nutrientes essenciais, aumento da eficiência da fotossíntese, entre outros (Liu et al., 2019). Portanto, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho hídrico e produtivo da alface hidropônica em função de níveis de salinidade e aplicação foliar de silício.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), da Universidade Federal do Cariri (UFCA), Campus Crato-CE (7°14'03" S e 39°24'34" W, altitude de 420 m), em ambiente protegido durante o mês de maio de 2025. O delineamento experimental foi de blocos casualizados com parcelas subdivida em esquema fatorial de 4 x 2, com 4 repetições, totalizando 32 parcelas com 5 plantas cada uma, totalizando 160. Segundo Alberoni (1998), a condutividade elétrica para o cultivo de alface em sistema hidropônico é considerada tolerável entre as faixas de 1,5 a 3,5 dS m⁻¹, instigando a determinação dos tratamentos compostos por 4 níveis de salinidade da solução nutritiva (1,5; 2,5; 3,5 e 4,5 dS m⁻¹), adicionado o NaCl, com e sem a aplicação foliar do silício (0,0 e 6,0 mM).

A fonte de silício utilizada foi o ácido salicílico, aplicado semanalmente com pulverizador manual, após o transplântio das mudas para os perfis hidropônicos com 15 dias posterior a semeadura, e apresentando um total de 4 folhas definitivas. Cada tratamento salino foi atendido por um reservatório individual (50L), totalizando 4 unidades. A solução nutritiva foi formulada

de acordo com recomendações preconizadas por Furlani (1998) e bombeada por meio de 4 bombas automáticas, compartilhadas entre os blocos e seus respectivos tratamentos, mantendo o funcionamento a cada 15 minutos, com intervalos de 15 e 30 minutos durante o dia e a noite, respectivamente.

Durante todo o experimento, o monitoramento e o controle do pH e da condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva foram regularmente medidos, com a utilização do pHmetro e condutivímetro portátil, mantendo sempre nas faixas desejadas. Para quantificar as medidas de teor de água da parte aérea (TA_{PA}) e raiz (TA_R) foi utilizada a metodologia proposta por Benincasa (2003), com as seguintes equações:

$$TA_{PA} = ((MFT - MST) / MSPA) \times 100 \quad (1)$$

$$TA_R = ((MFR - MSR) / MSR) \times 100 \quad (2)$$

Em que:

MFT: Massa fresca total

MST: Matéria seca total

TA_{PA} : Teor de água da parte aérea (%)

TA_R : Teor de água da raiz

Foi necessário a análise da massa da matéria fresca (MF) e matéria seca (MS) utilizando balança de precisão, determinada após a separação de parte aérea e raiz inseridas em sacos de papel “kraft” e colocadas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65 °C, até atingir massa constante. A razão entre raiz e parte aérea (R/PA) foi calculada de acordo com procedimentos de Magalhães (1979), representado pela equação:

$$rR/PA = (MSR / MSPA) \times 100 \quad (3)$$

Em que:

R/PA: Razão raiz parte aérea (adimensional)

MSR: Massa seca da raiz (g)

MSPA: Massa seca da parte aérea (g)

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p < 0,05$), utilizando-se o software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2019). Quando constatado efeito significativo dos fatores, esses foram avaliados mediante análise de regressão polinomial e teste de médias de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a tabela de análise de variância, os resultados apontam efeito significativo dos fatores isolados para a variável MF ($p \leq 0,01$). Já para as variáveis MS ($p \leq 0,05$), R/PA ($p \leq 0,05$), TA_{PA} ($p \leq 0,01$) e TA_R ($p \leq 0,01$) houve efeito significativo apenas para o fator níveis de salinidade.

Tabela 1. Análise de variância para a massa fresca (MF), massa seca (MS), relação raiz/parte aérea, teor de água da parte aérea (TA_{PA}) e teor de água da raiz (TA_R) da cultura da alface sob cultivo hidropônico em função de níveis de salinidade com e sem a aplicação de silício

FV	GL	Quadrado Médio		
		MF	MS	R/PA
Níveis de Salinidade (S)	3	2843,96**	57,340*	0,0267*
Silício (Si)	1	1201,61**	29,838 ^{ns}	0,0015 ^{ns}
S x Si	3	64,13 ^{ns}	20,660 ^{ns}	0,0017 ^{ns}
Bloco	3	100,01 ^{ns}	28,163 ^{ns}	0,0013 ^{ns}
Resíduo	21	91,75	17,317	0,0078
CV	%	9,66	31,59	39,52

FV	GL	Quadrado Médio	
		TA_{PA}	TA_R
Níveis de Salinidade (S)	3	140,97**	30,263**
Silício (Si)	1	0,022 ^{ns}	0,300 ^{ns}
S x Si	3	11,60 ^{ns}	6,120 ^{ns}
Bloco	3	10,79 ^{ns}	4,733 ^{ns}
Resíduo	21	21,16	6,191
CV	%	5,57	12,80

ns: não significativo; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

A variável MF (Figura 1A) demonstrou um decréscimo de 13,83 g para cada aumento unitário dos níveis de sais. Entre o nível de salinidade de 1,5 dS m⁻¹ (119,92 g) a 4,5 dS m⁻¹ (78,43 g) a redução percentual foi de 34,6%, porém essa diminuição se observou com menos impacto entre os níveis de 3,5 dS m⁻¹ (92,26 g) e 4,5 dS m⁻¹ (78,43 g), sendo de 17,63%. Em relação a aplicação de silício (Figura 1A), constatou-se um declínio entre as médias de peso da variável MF sem silício (105,29g) e com silício (93,03g), retratando uma perda de 13,17%. Neves et al. (2020) observou que a depender da concentração de silício, diminui-se o crescimento e desenvolvimento da planta entre diferentes cultivares de alface, conseqüentemente, interfere no peso da massa fresca e também da massa seca. O mesmo comportamento de redução foi observado na massa seca (Figura 1B), onde entre os níveis de 1,5 dS m⁻¹ (16,06 g) a 4,5 dS m⁻¹ (10,28 g) verifica-se que houve uma redução de 35,99 %.

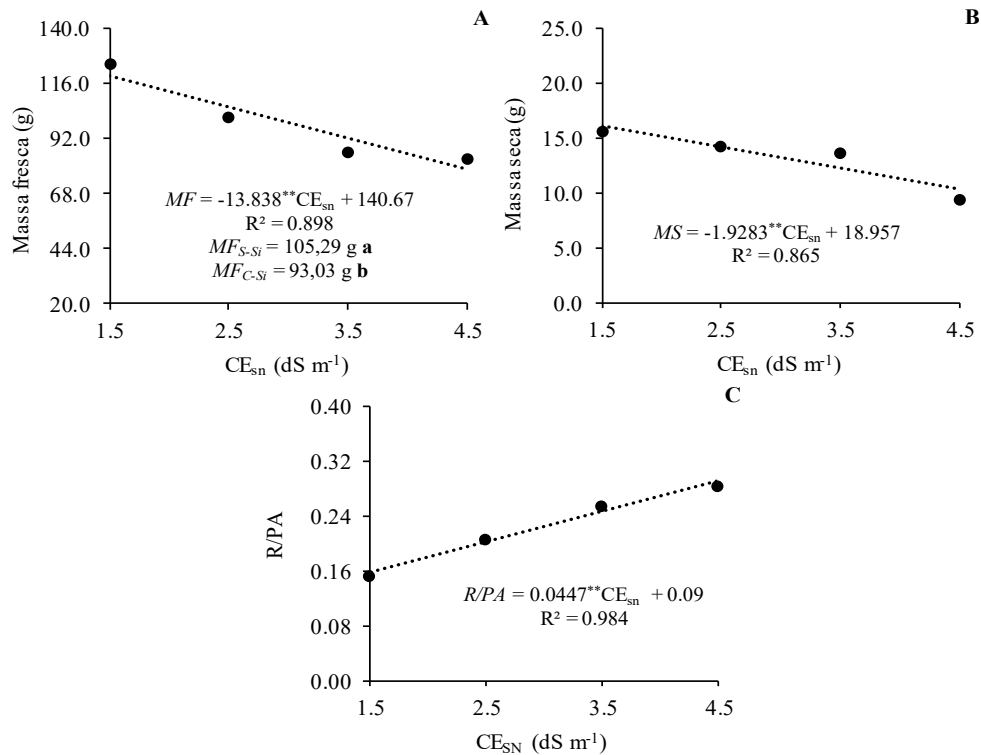


Figura 1. Massa fresca (A) da alface em função do efeito isolado dos níveis de salinidade e da condição com e sem silício, massa seca (B) e relação raiz/parte aérea apenas em função dos níveis de salinidade. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as condições com e sem a aplicação de silício pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ** - Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Constata-se que o excesso de sais na solução nutritiva limita a produção de biomassa nas plantas de alface. Segundo Dhiman et al. (2021), o estresse salino limita o crescimento e a produtividade das plantas, impactando severamente em processos fisiológicos fundamentais. Estudos afirmam que o excesso de sais danifica as membranas, reduz a eficiência da fotossíntese, interrompe o equilíbrio de nutrientes, altera os níveis de reguladores de crescimento, inibe a atividade enzimática e causa disfunção metabólica nas plantas (Kataria & Verma, 2018; Tahjib et al., 2018; Ali et al., 2023).

A relação R/PA cresceu de forma linear para cada aumento unitário de nível de CE. A relação R/PA do nível de sal de 1,5 dS m⁻¹ (0,1570) a 4,5 dS m⁻¹ (0,2911) apresentou aumento, e este foi de 85,41%, demonstrando uma maior sensibilidade da parte aérea em relação ao sistema radicular sobre o desenvolvimento em condições de estresse salino, e garantindo uma forma de desenvolvimento para mitigar a situação adversa nele inserido. A redução do desenvolvimento vegetativo da parte aérea reflete o aumento da relação R/PA, uma vez que o sistema radicular tende a desenvolver-se mais buscando áreas com menor salinidade.

O teor de água da parte aérea (TA_{PA}) (Figura 2A) apresentou em queda no decorrer do aumento salino. O primeiro nível (1,5 dS m⁻¹) na qual apresentou TA_{pa} de 87,41 g L⁻¹ e o último

com 4,5 dS m⁻¹ foi de 77,66 TA_{pa} (g L⁻¹), evidencia uma perda de 11,15% ao longo dos níveis de sais. O comportamento para o TA_r foi diferente, demonstrando haver um ponto de mínima na CE de 3,14 dS m⁻¹ onde apresentou um TA_R de 87,10 g L⁻¹ de água. Já na salinidade de 1,5 dS m⁻¹, o TA_R obtido foi de 90,8 g L⁻¹, evidenciando uma redução de 4,07%. À medida que houve o crescimento de CE do ponto mínimo até a concentração de 4,5 dS m, resultou em um teor de 89,60 g L, promovendo um aumento de 2,87%.

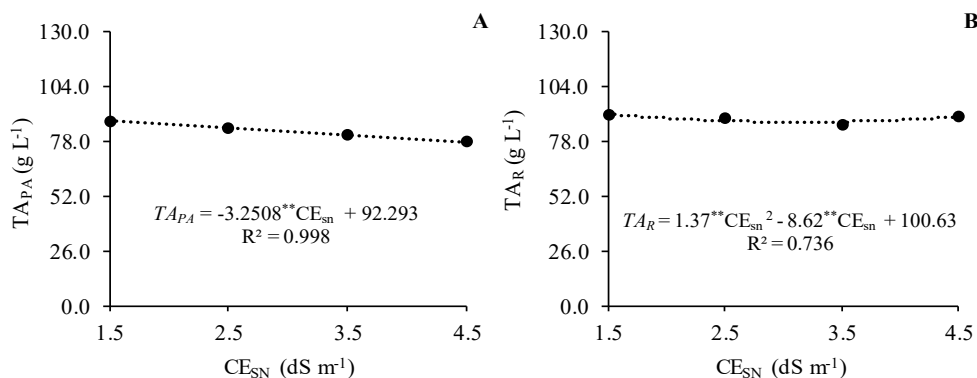


Figura 2. Teor de água da parte aérea (A) e teor de água da raiz (B) da alface sob efeito isolado dos níveis de salinidade. ** - Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Observa-se que o aumento do estresse salino induz ao estresse hídrico, devido à redução no teor de água da planta. O teor de água na biomassa vegetal pode ser um valioso indicador do estado hídrico das plantas. De acordo com Ali et al. (2023), o conteúdo de água nas plantas pode representar o desempenho dos processos dos metabólicos que ocorrem nos tecidos vegetais. Os autores afirmam ainda que, o estresse salino frequentemente perturba o equilíbrio hídrico das plantas, reduzindo o seu conteúdo de água; fato que pode ser atribuído ao encolhimento dos sistemas radiculares, que não conseguem compensar adequadamente a perda de água causada pela redução da área de superfície de absorção devido ao processo de transpiração (Souana et al., 2020).

CONCLUSÕES

O aumento dos níveis de salinidade reduziu os aspectos de produção da cultura da alface. A aplicação de silício não atenuou o estresse salino no acúmulo de massa fresca das plantas. O teor de água nas raízes-TA_r, apresentou tendência crescente com a intensificação do estresse salino, o que configura um mecanismo de adaptação. Estudos futuros são necessários para

analisar concentrações diferentes de silício e os possíveis efeitos nas plantas sobre estresse salino.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao grupo de pesquisa LEMGE (Laboratório de Estatística, Modelagem e Geoprocessamento) e a Universidade Federal do Cariri (CCAB/UFCA, Crato, CE) pelo apoio, orientação e logística na realização dos trabalhos. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo seu apoio financeiro aos bolsistas participantes desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERONI, R.B. **Hidroponia - como instalar e manejar o plantio de hortaliças dispensando o uso do solo**. São Paulo: Nobel, 1998. 102 p.

ALI, Q.; AHMAD, M.; KAMRAN, M.; ASHRAF, S., SHABAAN, M.; BABAR, B. H.; ZULFIQAR, U.; HAIDER, FU.; ALI, M. A. ELSHIKH, M. S. Efeitos sinérgicos de rizobactérias e ácido salicílico na tolerância ao estresse salino em milho. **Plants**, v. 12, n. 13, p. 2519, 2023.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 41p.

DEMARTELAERE, A. C. F.; SILVA, T. B. M.; PRESTON, H. A. F.; FERREIRA, A. S.; RODRIGUES, A. L. S.; FEITOSA, S. S.; PRESTON, W.; MEDEIROS, D. C. DE; ROSADA, A. K. H. B.; SILVA, R. M.; BENJAMIN, R. F. O cultivo hidropônico de alface com água de reúso/Cultivo hidropônico de alface com água de reúso. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, v. 11, pág. 90206–90224, 2020.

DHIMAN, P., RAJORA, N., BHARDWAJ, S., SUDHAKARAN, S. S., KUMAR, A., RATURI, G., CHAKRABORTY, K., GUPTA, O. P., DEVANNA, B. N., TRIPATHI, D. K., & DESHMUKH, R. Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162 p. 110–123, 2021.

FERREIRA, D. F. SISVAR: Um sistema computacional de análise para delineamentos de parcelas subdivididas com efeitos fixos. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FURLANI, P. R. **Instrucoes para o cultivo de hortalias de folhas pela tecnica de hidroponia-NFT**. IAC, 1998.

GALVÃO, S. Desafios alimentares no sertão nordestino: da tradição à influência dos ultraprocessados. **Cadernos de Agroecologia**, v. 19, n. 1, 2024.

GAMA, E. M.; REIS, A. C. P. R.; MATOS R. P; GOMES, F. J. S. QUALIDADE DA ÁGUA EM ÁREAS DE CULTIVO DE ALFACE. RECIMA21-**Revista Científica Multidisciplinar**-ISSN 2675-6218, v. 4, n. 5, p. e453099-e453099, 2023.

KATARIA, S.; VERMA, S. K. Salinity stress responses and adaptive mechanisms in major glycophytic crops: the story so far. In Salinity Responses and Tolerance in Plants, Targeting Sensory, Transport and Signaling Mechanisms, **Cham: Springer International Publishing**, v. 1, p. 1-39, 2018.

KHALIFA, G. S.; ABDELRASSOUL, M.; HEGAZI, A. M.; ELSHERIFET, M. H. Attenuation of negative effects of saline stress in two lettuce cultivars by salicylic acid and glycine betaine. **Gesunde Pflanzen**, v. 68, n. 4, p. 177-189, 2016.

LAVARIA, E. F.; SILVA, N. L. F; CAMARGO, O. G.; MESQUITA, D. Z. Protótipo de hidroponia comercial NFT de baixo custo. **Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)**, v. 4, n. 1, 30 out. 2020.

LEMONS, J. J. S. Vulnerabilidades induzidas no semiárido brasileiro. **DRd - Desenvolvimento Regional em debate**, v. 10, p. 245-268, 2020.

LIU, B.; Soundarajan, P.; Manivannan, A. Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. **Plants**, v. 8, n. 9, p. 307, 2019.

MAGALHÃES, A. C. N. **Análise quantitativa do crescimento**. **Fisiologia vegetal**, v. 1, n. 2, p. 333-350, 1979

NENES, G. M; PINHEIRO, S. M. G. P; CARDOSO, F. L; MACHADO, R. S; MAMBRI, A. P. S; ANDRIOLO, J, L. Silício no crescimento e desenvolvimento de plantas de alface em cultivo fora do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 2330-2337, 2020.

PAULUS, D.; PAULUS, E.; NAVA, G. A.; MOURA, C. A. Crescimento, consumo hídrico e composição mineral de alface cultivada em hidroponia com águas salinas. **Revista Ceres**, v. 59, p. 110-117, 2012.

SAATH, K.; FACHINELLO, A. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, p. 195-212, 2018.

SENA, E. O. L. P; SENA, W. L; MEDEIROS, J. G. S; MEIRELES, R. O; SILVA, ANDRÉ L. P; LÉLIS, A. T; SILVA, B. M; NETO, J. F. B. Concentração dos nutrientes e temperatura como fatores limitantes no cultivo hidropônico. **Observatório de La Economía Latino Americana**, v. 21, n. 10, p. 15418–15440, 2023.

SILVA, A. T.; NASCIMENTO, P. S. R. Caracterização da vulnerabilidade à desertificação por geotecnologias no sul do estado de Sergipe. **Scientia Plena**, v. 20, n. 8, 2024.

SOUANA, K., TAÏBI, K., AIT ABDERRAHIM, L., AMIRAT, M., ACHIR, M., BOUSSAID, M., & MULET, J. M. Salt-tolerance in *Vicia faba* L. is mitigated by the capacity of salicylic acid to improve photosynthesis and antioxidant response. **Scientia Horticulturae**, 273, 109641. 2020.

TAHJIB-UL-ARIF, M.; SIDDIQUI M. N.; SOHAG A. A. M.; SAKIL M. A.; RAHMAN M. M.; POLASH M. A. S.; MOSTOFA M. G.; TRAN L. S. P. O aumento dos atributos da fotossíntese e da capacidade antioxidante mediados por ácido salicílico contribui para a melhoria da produtividade de plantas de milho sob estresse salino. **J Plant Growth Regul** v.37, p. 1318–1330 (2018).

VELOSO, L. L. S.; AZEVEDO, C. A. V.; NOBRE, R. G.; LIMA, G. S.; CAPITULINO, J. D.; SILVA, F. A. H₂O₂ alleviates salt stress effects on photochemical efficiency and photosynthetic pigments of cotton genotypes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 34-41, 2022.