

TROCAS GASOSAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB ESTRESSE SALINO E ESTRATÉGIAS DE LIXIVIAÇÃO

José Edson Florentino de Morais¹, Arik Mendes Estima², José Kauã Silva de Assis³, Edimir Xavier Leal Ferraz⁴, Késia Ferreira Nogueira⁵, Enio Farias de França e Silva⁶

RESUMO: A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma cultura de grande importância social, econômica e ambiental. No Brasil é cultivada principalmente em regiões litorâneas que apresentam problemas de salinização do solo e da água, afetando o seu desempenho agrônomico. Assim, o objetivo foi avaliar as trocas gasosas da cana-soca irrigada com água de diferentes salinidades e estratégias de lixiviação. O experimento foi conduzido no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE. A variedade de cana-de-açúcar (RB041443) foi conduzida sob irrigação por gotejamento. O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 x 2 com quatro repetições, sendo cinco níveis de salinidade da água de irrigação (0,5; 2,5; 4,5; 6,5 e 8,5 dS m⁻¹) e duas condições de lixiviação (sem FL = 0 e com fração de lixiviação FL = 0,20). Foram analisadas variáveis de trocas gasosas (fotossíntese – A, transpiração – E, condutância estomática – gs e concentração de CO₂ intercelular – Ci). O incremento da salinidade da água de irrigação afetou negativamente A, E e gs e aumentou Ci da cana-soca. A fração de lixiviação de 0,20 mitigou os efeitos deletérios dos sais nas trocas gasosas.

PALAVRAS-CHAVE: *Saccharum* spp., salinidade, fração de lixiviação.

¹ Pesquisador Pós-Doutorado, Depto de Engenharia Agrícola, UFRPE, Recife, PE. e-mail: joseedson.morais@ufrpe.br

² Apresentador/Graduando em Engenharia Agrícola e Ambiental, Depto de Engenharia Agrícola, UFRPE, CEP: 52171-900, Recife, PE. Fone: (81) 995305117. e-mail: arik_estima@hotmail.com

³ Graduando em Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco/Departamento de Agronomia, e-mail: kaua.assis@ufrpe.br

⁴ Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco/Departamento de Engenharia Agrícola, e-mail: edimirferraz@outlook.com

⁵ Doutoranda em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco/Departamento de Engenharia Agrícola, e-mail: kezia.nogueira@ufrpe.br

⁶ Prof. Doutor, Depto de Engenharia Agrícola, UFRPE, Recife, PE. e-mail: enio.silva@ufrpe.br

GAS EXCHANGE IN SUGARCANE UNDER SALT STRESS AND LEACHING STRATEGIES

ABSTRACT: Sugarcane (*Saccharum* spp.) is a crop of great social, economic, and environmental importance. In Brazil, it is primarily cultivated in coastal regions, which often face issues related to soil and water salinization, negatively impacting agronomic performance. Therefore, this study aimed to evaluate the gas exchange of ratoon sugarcane irrigated with water of different salinities and leaching fraction strategies. The experiment was conducted at the Department of Agricultural Engineering of the Federal Rural University of Pernambuco, in Recife, PE, Brazil. The sugarcane variety (RB041443) was grown under drip irrigation. A completely randomized design was used in a 5×2 factorial arrangement with four replications, consisting of five irrigation water salinity levels (0.5, 2.5, 4.5, 6.5, and 8.5 dS m⁻¹) and two leaching fraction conditions (without LF = 0 and with leaching fraction LF = 0.20). The gas exchange variables analyzed were photosynthesis (A), transpiration (E), stomatal conductance (gs), and intercellular CO₂ concentration (Ci). Increasing irrigation water salinity negatively affected A, E, and gs, while Ci increased in ratoon sugarcane. A leaching fraction of 0.20 mitigated the deleterious effects of salts on gas exchange.

KEYWORDS: *Saccharum* spp., salinity, leaching fraction.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é cultivada em mais 100 países, em uma área de aproximadamente 25,83 milhões de hectares (FAO, 2019). O Brasil destaca-se no cenário agrícola, ocupando a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar. De acordo com a CONAB (2024) na safra 2024/2025 a estimativa de área colhida no país é de 8,7 milhões de hectares, indicando uma produção de 678,67 milhões de toneladas.

Na região Nordeste, a cana-de-açúcar é cultivada, principalmente, sob regime de sequeiro, sendo a maior parte dos cultivos localizados nos tabuleiros costeiros do Litoral e Agreste, apresentando produtividade média na safra 2023/2024 de 65,2 Mg ha⁻¹, abaixo da nacional (81,1 Mg ha⁻¹). Segundo a ANA (2021), apesar de ser a cultura agrícola com maior área irrigada no Brasil, na região Nordeste apenas 51,6% apresentam algum tipo de irrigação. Esses cultivos se localizam no embasamento rochoso dando origem a salinização natural das águas. Além disso,

a deposição de sais dos oceanos pelos ventos na forma de aerossóis, excesso de irrigação e intrusão salina (Hualpa-Hamirez et al., 2024).

Os estresses ambientais reduzem consideravelmente a produtividade das culturas e atingem mais de 50% da produção mundial (Roorkiwal et al., 2020; Berto et al., 2025). No mundo, a área total de terras afetadas por sal é estimada em 1.1 milhões de hectares, 7% da área total. Estima-se que 33% dos solos aráveis irrigados sejam afetados pela salinização (Hopmans et al., 2021).

A resposta das plantas à salinidade ocorre em duas fases distintas, sendo a primeira após o contato com a salinidade, chamada fase osmótica, em que sais (Ca^{2+} ; K^+ , Na^+ e Cl^-) atingem as raízes diminuindo o potencial osmótico da relação solo-planta, dificultando a absorção de água e de nutrientes pela planta; a segunda é a fase iônica, quando o sal atinge a parte aérea da planta em altas concentrações causando toxicidade (Munns e Tester, 2008), como respostas há redução das trocas gasosas, conseqüentemente, no crescimento e na produtividade.

Segundo Zhang et al. (2019), nos casos em que os níveis salinos são prejudiciais às plantas, o uso da fração de lixiviação é a chave para uma irrigação bem-sucedida. A cana-de-açúcar é uma glicófita classificada como moderadamente sensível à salinidade, com valor limiar de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$ (Maas, 1984). Nesse contexto, objetivou-se avaliar as trocas gasosas da cana-soca irrigada com água de diferentes salinidades e estratégias de lixiviação.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento está sendo conduzido na Estação de Agricultura Irrigada Prof. Ronaldo Freire de Moura, localizada no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, PE, cujas coordenadas geográficas são $8^\circ 01' 06''$ de latitude Sul e $34^\circ 56' 49''$ de longitude Oeste, e altitude de 6 m. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é As, Megatérmico Tropical (tropical úmido) de acordo com a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013).

A área experimental é composta por uma estação lisimétrica 40 lisímetros de drenagem (1 m^3 cada), uma estação meteorológica automática, uma casa de alvenaria para coleta do lixiviado. Os lisímetros foram preenchidos com solo classificado como Espodossolo Humilúvico segundo a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Santos et al., 2013) correspondente a Espodossolo Ortodoxo na classificação U.S. Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2022).

Tabela 1. Análise química e física do Espodossolo Humilúvico

Características químicas											
pH	P	Ca	Mg	Na	K	Al ³	H	SB	CTC	V	m
H ₂ O	mg dm ⁻³	----- cmolc dm ⁻³ -----				----- % -----					
6,10	68,00	1,25	0,50	0,02	0,10	0,00	1,65	1,87	3,52	53,12	0,0
Características físicas											
M.O	Areia	Silte	Argila	Ds	Dp	θ: 0,33 atm	θ: 15 atm				
----- g kg ⁻¹ -----			----- g cm ⁻³ -----			----- % -----					
20,40	940,0	0,0	60,0	1,48	2,63	3,02	1,34				

*SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: Saturação por bases; m: saturação por Al³⁺; M.O: matéria orgânica; Ds: densidade do solo; Dp: densidade da partícula; θ: unidade volumétrica.

O delineamento experimental utilizado é o inteiramente casualizado em esquema fatorial 5×2 , com quatro repetições: cinco níveis de salinidade da água de irrigação (CE: 0,5; 2,5; 4,5; 6,5 e 8,5 dS m⁻¹) e as condições sem (FL0) e com (FL0,2) fração de lixiviação, correspondente a lâmina de 100 e 120% de reposição da evapotranspiração de referência (ETc), totalizando 40 parcelas experimentais.

A variedade de cana-de-açúcar (RB041443) encontra-se no segundo ciclo de cultivo (cana-soca). Os níveis de salinidade da água de irrigação foram obtidos pela adição de NaCl e CaCl₂.H₂O (P.A) na proporção de 1:1 molar (Ca:Na) a água de abastecimento local (CEa = 0,5 dS m⁻¹) conforme Richards (1954):

$$Q_s = 640 \times CEa, \text{ quando } CEa < 5,0 \text{ dS}^{-1} \quad (1)$$

$$Q_s = 800 \times CEa, \text{ quando } CEa > 5,0 \text{ dS}^{-1} \quad (2)$$

Em que,

Q_s - quantidade de sais (mg L⁻¹);

CEa - valor desejado da condutividade elétrica da água (dS m⁻¹).

O preparo das soluções foi monitorado com auxílio de um condutivímetro portátil (Modelo: AK51). O sistema de irrigação por gotejamento com gotejadores autocompensantes (tipo PCJ/CNL NetafimTM) com vazão unitária de 4,1 L h⁻¹. As irrigações foram realizadas diariamente com base na evapotranspiração da cultura (ETc) para reposição das lâminas de 100% e 120% da ETc:

$$ETc = ETo \times Kc \times Kl$$

Em que,

ETc = evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹); ETo = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Kc = coeficiente de cultivo (adimensional); Kl = coeficiente de localização médio (adimensional).

A ETo será determinada a partir de dados climáticos coletados na estação meteorológica automática, sendo os mesmos utilizados no método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). O Kc utilizado foi correspondente a cada fase fenológica da planta, de acordo com Doorenbos e Pruitt (1977). O KI foi determinado segundo metodologia proposta por Keller e Bliesner (1990).

Aos 150 dias após o corte (DAC) os parâmetros de trocas gasosas foram avaliados no terço médio da folha +3, com o auxílio de um Analisador Portátil de Gás Infravermelho (IRGA, modelo LICOR Li-6400) entre 9 e 11 horas, sob radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de $\sim 1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Foram obtidas as variáveis: fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (gs) e concentração de CO₂ intercelular (Ci).

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade, homocedasticidade e análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($P \leq 0,05$). Em seguida, os efeitos significativos para o fator salinidade foram comparados mediante análise de regressão ($P \leq 0,05$). As análises foram realizadas utilizando-se o software STATÍSTICA versão 10.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

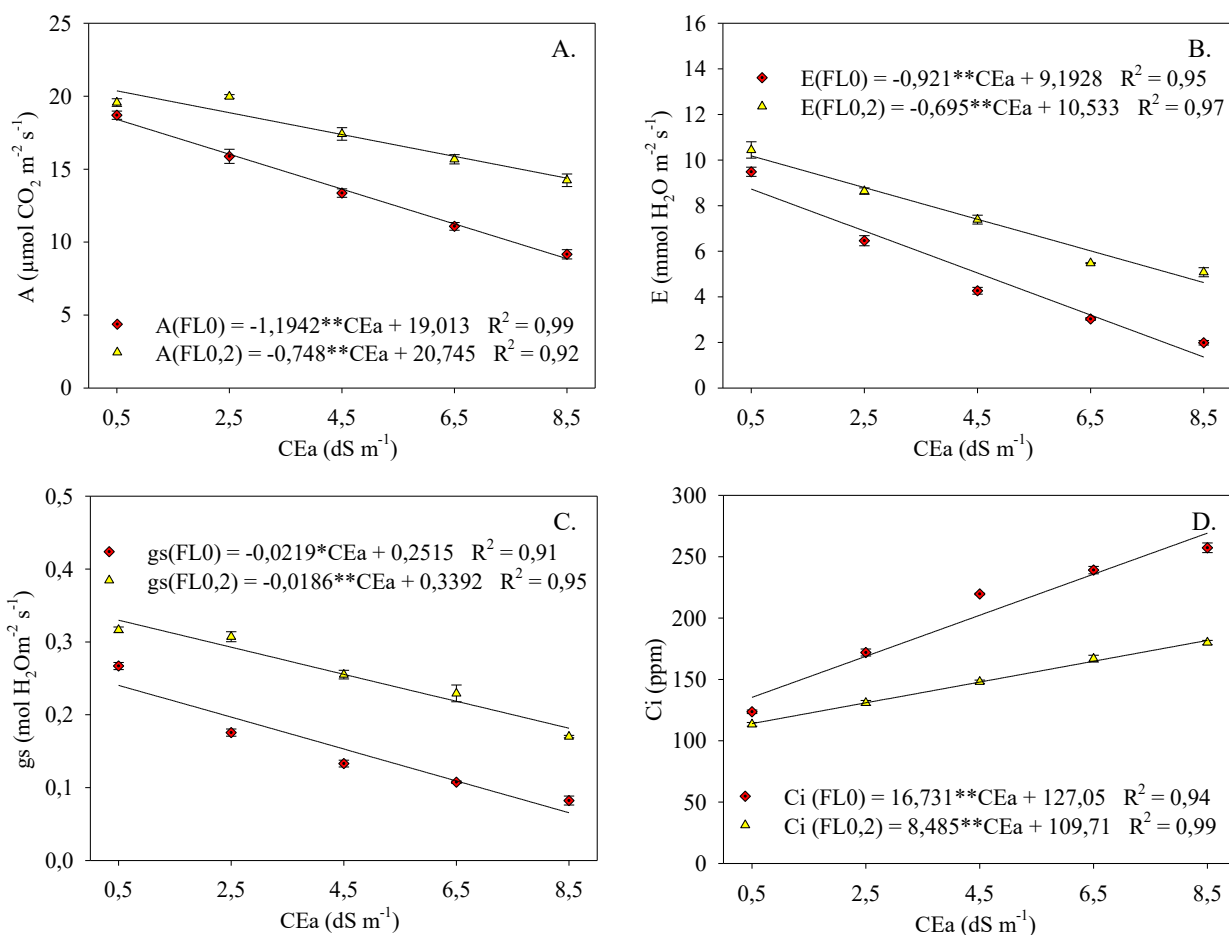
Aos 150 dias após o corte (DAC), houve efeito significativo ($P \leq 0,01$) da interação entre entre os níveis de salinidade da água de irrigação (CEa = 0,5; 2,5; 4,5; 6,5 e 8,5 dS m⁻¹) e as condições sem (FL0) e com fração lixiviação (FL0,2) nas variáveis das trocas gasosas: a fotossíntese líquida (A), transpiração foliar (E), condutância estomática (gs) e concentração intercelular de de CO₂ (Ci) pelo teste F (Tabela 1).

Tabela 2. Análise de variância para fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (Gs) e concentração interna de CO₂ (Ci) em cana-soca submetida níveis de salinidade e estratégias de lixiviação

Fonte de variação	GL	Quadrado médio			
		A	E	Gs	Ci
CEa	4	76,12**	54,12**	0,03**	13063,05**
FL	1	139,87**	55,76**	0,11**	296562,38**
CEa × FL	4	5,49**	1,57**	0,01**	1627,32**
Resíduo	30	4,33	0,13	0,00	21,62
CV	%	6,35	5,98	5,72	12,66

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ns - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CEa - condutividade elétrica da água de irrigação; FL - fração de lixiviação; CV - Coeficiente de variação.

Observou-se reduções na fotossíntese líquida (A) sendo de 1,1942 e 0,7480 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por incremento unitário da salinidade da água de irrigação (CEa) para a condição sem (FL0) e com fração de lixiviação (FL0,2), respectivamente (Figura 1A). Para FL0, as folhas das plantas de cana-soca apresentaram valores médios estimados para a fotossíntese líquida de 18,42 e 8,86 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (-51,88%) para as CEa de 0 e 8,5 dS m^{-1} , respectivamente, e para FL0,2 esses valores de A foram 20,37 e 14,39 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (-29,38%) para as respectivas CEa.



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). CEa – condutividade elétrica da água de irrigação.

Figura 1. Fotossíntese líquida - A (A), transpiração foliar (B), condutância estomática (C), concentração de CO_2 intercelular (D) em cana-soca submetida à irrigação com água salobra e sob as condições sem (FL0) e com (FL0,2) fração de lixiviação.

Em estudo com dez variedades de cana-de-açúcar (VAT 90212, RB 72454, RB 867515, Q124, RB961003, RB957508, SP791011, RB835089, RB92579 e SP 943206) sob níveis de salinidade da água de irrigação, em Petrolina- PE, Simões et al. (2019) observaram valores médios para as variedades RB de 38,6 e 19,3 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para 0 e 8,0 dS m^{-1} , respectivamente, uma redução de 50%, corroborando com os achados neste estudo.

A taxa de transpiração foliar (E) apresentou reduções de 0,9217 e 0,6950 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ por incremento unitário da CEa para FL0 e FL0,2, respectivamente (Figura 1B). Os valores médios estimados para a E na FL0 foram de 8,74 e 1,36 mmol H₂O m⁻² s⁻¹, uma redução percentual de 84,44% para as CEa de 0 e 8,5 dS m⁻¹, respectivamente, enquanto para FL0,2 esses valores foram 10,19 e 4,63 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ (-54,59%) para as respectivas CEa.

De acordo com Taiz et al. (2017), plantas sob estresse salino reduzem a taxa de A e a E, principalmente devido as limitações na abertura estomática, associada a um conjunto de processos que desencadeiam à diminuição da turgescência foliar, degradação dos pigmentos fotossintéticos, ineficiência fotoquímica, diminuição da atividade enzimática (PEPcase e Rubisco), desbalanço nutricional e baixo consumo de CO₂ nos cloroplastos.

Na Figura 1C, observou-se que a condutância estomática (gs) apresentou reduções de 0,0219 e 0,0186 mol H₂O m⁻² s⁻¹ por incremento unitário da CEa nas FL0 e FL0,2, respectivamente. Para a FL0, os valores médios estimados foram de 0,24 e 0,07 mol H₂O m⁻² s⁻¹ para as CEa de 0 e 8,5 dS m⁻¹, respectivamente, uma redução de 72,83%. Já a FL0,2 apresentou valores médios de 0,33 e 0,18 mol H₂O m⁻² s⁻¹ para as respectivas CEa, representando uma redução de 45,10%.

A salinidade promove uma maior dificuldade da planta em absorver água do solo (Munns e Tester, 2008), como resposta há uma tendência de a planta reduzir a perda de água pelos estômatos, com a diminuição da condutância estomática. Assim, pode-se sugerir com os resultados, que houve aumento da concentração de sais no solo, reduzindo o potencial osmótico e, conseqüentemente o potencial hídrico, afetando de forma significativa as trocas gasosas.

A concentração de CO₂ intercelular (Ci) apresentou aumentos 16,7310 e 8,4854 ppm por incremento unitário da CEa na FL0 e FL0,2, respectivamente (Figura 1D). Para FL0, as folhas das plantas de cana-soca apresentaram valores médios estimados da Ci de 135,42 e 269,26 ppm (+98,84%) para as CEa de 0 e 8,5 dS m⁻¹, respectivamente, enquanto na FL0,2 esses valores foram 113,94 e 181,83 ppm (+59,58%) para as respectivas CEa.

O aumento do CO₂ interno no mesófilo das folhas, provocado pela maior condutividade elétrica da água de irrigação, pode estar associado à menor condutância estomática durante o estresse salino. Essa condição pode aumentar o acúmulo de CO₂ no mesófilo foliar, mas restringir sua utilização na síntese de açúcares (Taiz et al., 2017; Simões et al., 2019).

CONCLUSÕES

O incremento da salinidade da água de irrigação afetou negativamente as trocas gasosas (fotossíntese, transpiração e condutância estomática) da cana-soca e aumentou as concentrações de CO₂ intercelular. A fração de lixiviação de 0,20 mitigou os efeitos deletérios dos sais na fotossíntese, transpiração e condutância estomática da cana-soca.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao INCT em Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical-INCTAGriS (CNPq/Funcap/Capes), processo 406570/2022-1 (CNPq) e processo INCT-35960-62747.65.95/51 (Funcap). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Pós-doutorado do primeiro autor (processo 153348/2024-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R.G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

Alvares, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711-728, 2014. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021. 130p. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/asp/download.asp?codigo=148256&tipo_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=88090&tipo=1&iBanner=0&iIdioma=0. Acesso em: 21 fev. 2025.

Berto, S.D.C. et al. Silicon mitigates the effects of water deficit in ratoon sugarcane and enhances leaf water potential, osmotic adjustment, and biomass production. **Journal of Plant Growth Regulation**, 2025. <https://doi.org/10.1007/s00344-025-11761-0>

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. v.11 - safra 2023/2024 - Primeiro levantamento. Brasília, 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 16 jun. 2025.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World Food and Agriculture - Statistical pocketbook 2019**. Rome. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca6463en/ca6463en.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

Hopmans, J.W. et al. Chapter one-critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity. **Advances in Agronomy**, v.169, p.1-191, 2021. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.03.001>

Hualpa-Ramirez, E. et al. Stress salinity in plants: New strategies to cope with in the foreseeable scenario. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.208, p. 108507, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108507>

Keller, J.; Bliesner, R. D. Sprinkle and trickle irrigation. New York: Avibook, 1990. 649 p.

Maas, E. V. Crop tolerance. **California Agriculture**, v.36, p.20-21, 1984.

Munns, R.; Tester, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.651-681, 2008. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>

Roorkiwal, M. et al. Integrating genomics for chickpea improvement: achievements and opportunities. **Theoretical and Applied Genetics**, v.133, p.1703–1720, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03584-2>

Richards, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington D.C., U.S. **Salinity Laboratory**. (USDA Agriculture Handbook, 60). 1954. 160p.

Santos, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

Simões, W.L. et al. physiological and biochemical responses of sugarcane varieties to salt stress. **Revista Caatinga**, v.32, n.4, p.1069-1076, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252019v32n423rc>

SOIL SURVEY STAFF. Keys to soil taxonomy. 13.ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, **Natural Resources Conservation Service**, p.410, 2022.

Taiz, L. et al. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

Zhang, C. et al. Salt leaching and response of *Dianthus chinensis* L. to saline water dripirrigation in two coastal saline soils. **Agricultural Water Management**, v.218, n.1, p.8-16, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.020>