

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

DANIELA SIQUEIRA COELHO

**POTENCIAL DE CULTIVARES DE SORGO SACARINO IRRIGADAS
COM ÁGUAS SALINAS**

**RECIFE
2017**

Daniela Siqueira Coelho
Engenheira Agrícola e Ambiental

Potencial de cultivares de sorgo sacarino irrigadas com águas salinas

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Ciências do Solo

Orientadora: Profa. Dra. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire

Coorientador: Dr. Welson Lima Simões

RECIFE
2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S237i Coelho, Daniela Siqueira
Potencial de cultivares de sorgo sacarino irrigadas com águas salinas / Daniela Siqueira Coelho. – 2017.
105 f. : il.

Orientadora: Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2017.
Inclui referências e apêndice(s).

1. *Sorghum bicolor* (L.) Moench. 2. Estresse salino
3. Crescimento 4. Respostas fisiológicas 5. Desbalanço nutricional
I. Freire, Maria Betânia Galvão dos Santos, orient. II. Título

CDD 631.4

DANIELA SIQUEIRA COELHO

Potencial de cultivares de sorgo sacarino irrigadas com águas salinas

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Ciência do Solo.

Aprovada em 04 de Julho de 2017

Profa. Dra. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire
Orientadora
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Dr. José Nildo Tabosa
Instituto Agronômico de Pernambuco

Profa. Dra. Lilia Willadino
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Fernando José Freire
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de agradecer a todos que estiveram presentes em minha vida e contribuíram de alguma forma nesses últimos anos até chegar a esse momento tão esperado.

Inicialmente, gostaria de agradecer a Deus por ter me guiado nessa caminhada.

Aos meus pais e meu irmão, por todo apoio e dedicação em todas as etapas de minha vida acadêmica, tornando esse sonho possível. Não esquecendo da minha cunhada Kettily pelo acompanhamento psicológico gratuito.

Em especial, ao meu esposo Jailson, por todo carinho, companheirismo, paciência e ainda pelo suporte dado na execução dos trabalhos da tese.

À equipe de trabalho da Embrapa Semiárido, Bruna, Emanuel, Pedro Paulo, Moisés, especialmente, Francisco (Chiquinho) e Miguel por toda a prestatividade.

Aos amigos e colegas da pós-graduação da UFRPE pela oportunidade de compartilhar momentos de alegria e dificuldades e na curta fase de estudante fora de casa: Vinícius, Carlos Vítor, Thiago Schossler, Mayame, Juscélia, Igor, Luiz Antônio (Índio), Juliet e William.

À equipe do laboratório de Química do Solo da UFRPE, em especial Emanuelle, pelo período que ficou auxiliando na instalação do experimento.

À equipe do Laboratório de Química do Solo da UNIVASF, sob responsabilidade do Prof^o Augusto, pelo suporte dado na realização das análises químicas de solo e planta.

À equipe do Laboratório de Citologia e Fisiologia Vegetal da UNIVASF, chefiada pelo prof. Aliçandro, pelo suporte dado na realização das análises bioquímicas, especialmente minha amiga do coração, Vanusia, que sempre me ajudou em tudo que estivesse ao seu alcance.

Aos professores e pesquisadores envolvidos que contribuíram no enriquecimento desse trabalho: Dra. Alessandra Salviano (Embrapa Semiárido), Dr. José Nildo Tabosa (IPA), Prof. Mário Miranda Vilas Boas (UNIVASF).

Ao corpo docente da Pós-Graduação em Ciência do Solo da URFPE, pelos ensinamentos ou por colaborarem de alguma forma na minha formação.

À minha orientadora Profa. Betânia Freire e ao meu coorientador Dr. Welson Simões, pelo incentivo, amizade, prestatividade, e por estarem sempre à disposição para me auxiliar no que fosse necessário.

Enfim, a todos que participaram de forma direta e indireta na minha vida durante esse período. Meus sinceros agradecimentos!

LISTA DE FIGURAS

CRESCIMENTO DE CULTIVARES DE SORGO SACARINO IRRIGADAS COM ÁGUAS SALINAS.

- Figura 1- Altura das plantas (Ht) de sorgo sacarino a cada 15 dias após o plantio (DAP) das cultivares BR 506 (A), Willey (B), SF-11 (C), SF-15 (D), TF-17 (E), 467-4-2 (F), submetidas a diferentes níveis da salinidade (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 dS m^{-1}) da água de irrigação. Seta indica início da aplicação das soluções salinas. EC1, EC2 e EC3 indicam os estádios de crescimento da cultivar, finalizando na colheita 38
- Figura 2- Altura das plantas (Ht) e diâmetro do colmo (\emptyset) das cultivares de sorgo sacarino BR 506 (A), Willey (B), SF-11 (C), SF-15 (D), TF-17 (E), 467-4-2 (F), submetidas a diferentes níveis de salinidade (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 dS m^{-1}) da água de irrigação. Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**) e $p < 0,05$ (*)..... 39
- Figura 3- Matérias fresca (MFPA) e seca da parte aérea (MSPA) das cultivares de sorgo sacarino BR 506 (A), Willey (B), SF-11 (C), SF-15 (D), TF-17 (E), 467-4-2 (F), submetidas a diferentes níveis de salinidade (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 dS m^{-1}) da água de irrigação. Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**)..... 40
- Figura 4- Conteúdo de água (CA) dos colmos e sólidos solúveis totais ($^{\circ}\text{Brix}$) nos colmos das respectivas cultivares de sorgo sacarino: BR 506 (A), Willey (B), SF-11 (C), SF-15 (D), TF-17 (E), 467-4-2 (F), submetidas a diferentes níveis de salinidade (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 dS m^{-1}) da água de irrigação. Coeficientes da regressão significativos, com $p < 0,01$ (**) e $p < 0,05$ (*)..... 41
- Figura 5- Área foliar específica (AFE) e matéria seca das folhas (MSF) em plantas de sorgo sacarino, independente da cultivar, submetidas à irrigação com águas de diferentes níveis de salinidade (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 dS m^{-1}) . Coeficientes da regressão significativos, com $p < 0,01$ (**)..... 43

TROCAS GASOSAS E AJUSTAMENTO OSMÓTICO EM CULTIVARES DE SORGO SACARINO SOB ESTRESSE SALINO.

- Figura 1- Taxa de fotossíntese - P_n (A), condutância estomática - g_s (B), eficiência

intrínseca do uso da água - EIUA (C) e transpiração - T_p (D) em plantas de sorgo sacarino sete dias após o início da irrigação com águas salinas ($_1$) e próximo à colheita ($_2$). Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**).....	58
Figura 2- Transpiração medida próximo à colheita (E_2) das respectivas cultivares de sorgo sacarino BR 506 (A), Willey (B), SF-11 (C), SF-15 (D), TF-17 (E), 467-4-2 (F), irrigadas com águas de salinidade crescente (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 $dS\ m^{-1}$). Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**).....	59
Figura 3- Açúcares solúveis totais – AST (A), açúcares redutores - AR (B), proteínas solúveis - Pt (C) e aminoácidos livres - AA (D) em folhas de sorgo sacarino irrigado com águas de salinidade crescente, independente da cultivar. Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**).....	60
Figura 4- Teores de sódio (A) e cloro (B) em folhas das cultivares de sorgo sacarino BR 506 (C_1), Willey (C_2), SF-11 (C_3), SF-15 (C_4), TF-17 (C_5), 467-4-2 (C_6), irrigadas com águas de salinidade crescente (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 $dS\ m^{-1}$). Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**) ou $p < 0,05$ (*).....	61

ACÚMULO E DISTRIBUIÇÃO DE NUTRIENTES EM CULTIVARES DE SORGO SACARINO SOB ESTRESSE SALINO.

Figura 1- Relação entre a condutividade elétrica das soluções salinas aplicadas (CE_a) e os valores de condutividade elétrica da extrato de saturação do solo (CE_{es}) ao final do ciclo. **Coeficiente de regressão significativo ($p < 0,01$).....	78
Figura 2- Análise de Componentes Principais (ACP) com projeção do conteúdo de nutrientes e Na^+ em folhas (A), colmos (B) e raízes (C) de cultivares de sorgo sacarino submetidas a diferentes níveis de salinidade.....	79
Figura 3- Análise de Componentes Principais (ACP) do conteúdo de nutrientes e Na^+ em folhas com projeção nas cultivares de sorgo sacarino BR 506 (C_1), Willey (C_2), SF-11 (C_3), SF-15 (C_4), TF-17 (C_5), 467-4-2 (C_6) e níveis de salinidade (0,0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12,0 $dS\ m^{-1}$).....	80

LISTA DE TABELAS

CRESCIMENTO DE CULTIVARES DE SORGO SACARINO IRRIGADAS COM ÁGUAS SALINAS.

Tabela 1- Composição química e granulométrica do solo utilizado para o cultivo de sorgo sacarino sob diferentes níveis de salinidade.....	35
Tabela 2- Matéria seca da parte aérea (MSPA) e conteúdo de água (CA) dos colmos entre cultivares de sorgo sacarino para cada nível de salinidade.....	42
Tabela 3- Área foliar específica (AFE), número de perfilhos (NPf) e matéria seca das folhas (MSF) em cultivares de sorgo sacarino independente do nível de salinidade.....	42

TROCAS GASOSAS E AJUSTAMENTO OSMÓTICO EM CULTIVARES DE SORGO SACARINO SOB ESTRESSE SALINO.

Tabela 1- Composição química e granulométrica do solo utilizado para o cultivo de sorgo sacarino sob diferentes níveis de salinidade.....	55
Tabela 2- Variáveis avaliadas em cultivares de sorgo sacarino independente do nível de salinidade da água de irrigação.....	60

ACÚMULO E DISTRIBUIÇÃO DE NUTRIENTES EM CULTIVARES DE SORGO SACARINO SOB ESTRESSE SALINO.

Tabela 1- Composição química e granulométrica do solo utilizado para o cultivo de sorgo sacarino sob diferentes níveis de salinidade.....	75
Tabela 2- Valores médios e desvio padrão de pH, condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es}), cátions solúveis, relação de adsorção de sódio (RAS), cátions trocáveis e saturação por bases (V) no solo ao final do ciclo do sorgo sacarino em função da aplicação de águas salinas.....	77
Tabela 3- Teores de N, P, K, Ca, Mg e S em folhas de cultivares de sorgo sacarino submetidas a diferentes níveis de salinidade.....	81
Tabela 4- Teores de Mn, Zn, Fe e Cu em folhas de cultivares de sorgo sacarino submetidas a diferentes níveis de salinidade.....	82

LISTA DE SÍMBOLOS

CE_a	Condutividade elétrica da água de irrigação
CE_{es}	Condutividade elétrica do extrato de saturação
Ht	Altura da planta
\emptyset	Diâmetro do colmo
NPf	Número de perfilhos
MFPA	Matéria fresca da parte aérea
MSPA	Matéria seca da parte aérea
CA	Conteúdo de água dos colmos
SST	Sólidos solúveis totais
AFE	Área foliar específica
MSF	Matéria seca das folhas
P_{n1}	Taxa de fotossíntese na 1ª leitura
g_{s1}	Condutância estomática na 1ª leitura
T_{p1}	Transpiração na 1ª leitura
$EIUA_1$	Eficiência intrínseca do uso da água na 1ª leitura
P_{n2}	Taxa de fotossíntese na 2ª leitura
g_{s2}	Condutância estomática na 2ª leitura
T_{p2}	Transpiração na 2ª leitura
$EIUA_2$	Eficiência intrínseca do uso da água na 2ª leitura
AST	Açúcares solúveis totais
AR	Açúcares redutores
AA	Aminoácidos livres
Pt	Proteínas solúveis
$[Na^+]$	Teor de sódio nas folhas
$[Cl^-]$	Teor de cloreto nas folhas
λ	Autovalores das componentes principais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	19
1.1 Hipóteses.....	20
1.2 Objetivo Geral.....	21
1.3 Objetivos Específicos.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
REFERÊNCIAS.....	26
3 CRESCIMENTO DE CULTIVARES DE SORGO SACARINO IRRIGADAS COM ÁGUAS SALINAS.....	31
Resumo.....	32
Abstract.....	33
3.1 Introdução.....	34
3.2 Material e Métodos.....	35
3.3 Resultados.....	37
3.4 Discussão.....	37
3.5 Conclusões.....	43
Referências.....	46
4 TROCAS GASOSAS E AJUSTAMENTO OSMÓTICO EM CULTIVARES DE SORGO SACARINO SOB ESTRESSE SALINO.....	51
Resumo.....	52
Abstract.....	53
4.1 Introdução.....	54
4.2 Material e Métodos.....	55
4.3 Resultados.....	57
4.4 Discussão.....	62
4.5 Conclusões.....	65
Referências.....	66
5 ACÚMULO E DISTRIBUIÇÃO DE NUTRIENTES EM CULTIVARES DE SORGO SACARINO SOB ESTRESSE SALINO	69
Resumo.....	70
Abstract.....	71
5.1 Introdução.....	72

5.2 Material e Métodos.....	73
5.3 Resultados	75
5.4 Discussão.....	81
5.5 Conclusões.....	86
Referências.....	87
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
APÊNDICE A- Análise de variância (ANOVA) entre cultivares de sorgo sacarino, níveis de condutividade elétrica (CE _a) das soluções salinas e interação cultivares x CE _a para as variáveis testadas.....	97
APÊNDICE B- Análise de variância (ANOVA) entre cultivares de sorgo sacarino, níveis de condutividade elétrica (CE _a) das soluções salinas e interação cultivares x CE _a para trocas gasosas.....	97
APÊNDICE C- Análise de variância (ANOVA) entre cultivares de sorgo sacarino, níveis de condutividade elétrica (CE _a) das soluções salinas e interação cultivares x CE _a para teor de solutos orgânicos, Na ⁺ e Cl ⁻	99
APÊNDICE D- Análise de variância (ANOVA) entre cultivares de sorgo sacarino, níveis de condutividade elétrica (CE _a) das soluções salinas e interação cultivares x CE _a para teor de macronutrientes nas folhas.....	99
APÊNDICE E- Análise de variância (ANOVA) entre cultivares de sorgo sacarino, níveis de condutividade elétrica (CE _a) das soluções salinas e interação cultivares x CE _a para teor de micronutrientes nas folhas.....	101
APÊNDICE F- Correlação entre conteúdo de nutrientes e Na em folhas de cultivares de sorgo sacarino.....	101
APÊNDICE G- Correlação entre conteúdo de nutrientes e Na em colmos de cultivares de sorgo sacarino.....	103
APÊNDICE H- Correlação entre conteúdo de nutrientes e Na e raízes de cultivares de sorgo sacarino.....	103
APÊNDICE I- Autovalores, variância e correlação dos elementos com as duas componentes principais (CP1 e CP2) em folhas, colmos e raízes de cultivares de sorgo sacarino submetidas a diferentes níveis de salinidade.....	105

Potencial de cultivares de sorgo sacarino irrigadas com águas salinas

RESUMO

As crescentes perdas de produção em áreas agrícolas devido à salinização dos solos reforçam a necessidade de selecionar culturas cada vez mais tolerantes à salinidade, a exemplo do sorgo sacarino. No entanto, é importante o reconhecimento dos mecanismos de tolerância desenvolvidos pelas plantas que possam dar suporte à seleção de cultivares com potencial de uso em áreas cuja convivência com a salinidade seja inevitável. O objetivo deste estudo foi de selecionar cultivares de sorgo sacarino mais tolerantes à salinidade com base em características morfofisiológicas e nutricionais visando à identificação de genótipos promissores para utilização em áreas salinizadas, ou que não disponham de água adequada para irrigação. O experimento foi conduzido em casa de vegetação não climatizada, localizada na Universidade Federal do Vale do São Francisco, em Juazeiro-BA. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados dispostos em esquema fatorial 6 x 5. Seis cultivares (BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2) e soluções salinas com cinco valores de condutividade elétrica (0,0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12,0 dS m⁻¹), com três repetições foram testadas. As soluções salinas foram preparadas com NaCl, CaCl₂.2H₂O e MgSO₄.7H₂O na proporção de 7:2:1. A aplicação das soluções salinas foi iniciada duas semanas após a semeadura, permanecendo até a colheita. Para controle da irrigação, foram instaladas células de carga, que funcionaram como lisímetros de pesagem e taxa de leitura a cada 15 minutos. O volume de reposição de água foi aplicado a cada 48 horas com acréscimo de fração de lixiviação de 15%. A partir dos dados coletados neste experimento, dividiu-se este estudo em três etapas. Na primeira etapa, avaliou-se o crescimento das plantas para identificação de cultivares com potencial de cultivo sob salinidade. Na segunda etapa, foram estudadas as trocas gasosas e os teores foliares de Na⁺, Cl⁻ e solutos orgânicos em cultivares de sorgo sacarino sob estresse salino. Na terceira etapa, foi estudado o efeito do estresse salino sobre o acúmulo e distribuição de nutrientes nas cultivares de sorgo sacarino. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que as cultivares estudadas BR 506, TF-17 e 467-4-2 apresentam maior potencial de cultivo sob salinidade, sendo que a BR 506 é a mais adequada para produção de etanol. O aumento da salinidade causa redução significativa da atividade fotossintética das cultivares de sorgo sacarino, no entanto, a cultivar BR 506 demonstra ser a mais eficiente. A regulação de abertura estomática, o aumento da eficiência intrínseca do uso da água e o ajustamento osmótico, concentrando nutrientes e açúcares solúveis não redutores nas folhas representam alguns mecanismos de adaptação às condições de estresse salino nas cultivares de sorgo sacarino. O acúmulo de nutrientes foi limitado predominantemente pela redução do crescimento devido ao agravamento da salinidade e, em menor escala, pela competição entre elementos no solo, refletindo em diferenças no seu conteúdo em folhas e raízes.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Estresse salino. Crescimento. Respostas fisiológicas. Desbalanço nutricional.

Potential of sweet sorghum cultivars irrigated with saline waters

ABSTRACT

Increasing production losses in agricultural areas due to salinization of soils reinforce the need to select salinity-tolerant crops, such as sorghum. However, it is important to recognize the mechanisms of tolerance developed by the plants that can support the selection of cultivars with potential use in areas whose coexistence with salinity is unavoidable. The objective of this study was to select sweet sorghum cultivars more tolerant to salinity based on morphological and nutritional characteristics aiming at the identification of promising genotypes for use in salinized areas or that do not have adequate water for irrigation. The experiment was conducted in an greenhouse using the experimental design in randomized blocks arranged in a 6 x 5 factorial scheme. There were tested six cultivars (BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 and 467-4-2) and saline solutions with five values of electrical conductivity (0.0, 1.5, 3.0, 6 and 12.0 dS m⁻¹) using three replicates. The saline solutions were prepared with NaCl, CaCl₂.2H₂O and MgSO₄.7H₂O salts in the ratio of 7:2:1. The application of saline solutions was started two weeks after sowing, remaining until plants collecting. In the irrigation control, load cells were installed, which functioned as weighing lysimeters and recorded readings every 15 minutes. The volume of water replacement was applied every 48 hours with a 15% leaching fraction increase. From the data collected in this experiment, this study was divided into three stages. In the first stage, the growth of the plants was evaluated for identification of cultivars with potential of cultivation under salinity. In the second stage, the mechanisms involved in salinity tolerance of sorghum cultivars (related to gas exchanges), Na⁺ and Cl⁻ concentration and organic solutes in the leaves were studied. In the third stage, the effect of salts of the salt stress on the accumulation and distribution of nutrients in sweet sorghum cultivars was studied. From the results obtained it was verified that the studied cultivars BR 506, TF-17 and 467-4-2 present a higher potential of cultivation under salinity, and BR 506 is the most suitable for ethanol production. The increase in salinity causes a significant reduction in the photosynthetic activity of sweet sorghum cultivars, however, the cultivar BR 506 proves to be the most efficient. The regulation of stomatal opening increased intrinsic water use efficiency and osmotic adjustment, concentrating nutrients and non-reducing soluble sugars on the leaves represent some mechanisms of adaptation to saline stress conditions in sorghum cultivars. Nutrient accumulation was predominantly limited by the reduction of growth due to worsening salinity and, to a lesser extent, competition between soil elements, reflecting differences in leaf and root content.

Keywords: *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Salt stress. Growth. Physiological responses. Nutritional imbalance.

1 INTRODUÇÃO GERAL

As regiões áridas e semiáridas apresentam características edafoclimáticas específicas como predomínio de solos pouco desenvolvidos, elevadas taxas de evapotranspiração e baixa pluviosidade. O semiárido brasileiro, por exemplo, apresenta precipitação média anual de 400 mm, umidade relativa média do ar de 67,8%, temperatura média de 26,5°C e velocidade do vento de 2,3 m s⁻¹ (REDDY; AMORIM NETO, 1983).

Essas condições são bastante favoráveis à acumulação de sais na superfície do solo e ainda limitam a disponibilidade de água de boa qualidade, o que restringe o estabelecimento de culturas convencionais que, em sua maioria, são sensíveis à salinidade.

Os efeitos dos sais sobre as plantas estão relacionados à redução do potencial osmótico do solo, que dificulta a absorção de água pelas raízes (MUNNS; TESTER, 2008), além dos efeitos diretos de íons presentes na solução do solo, causando desequilíbrios nutricionais e danos estruturais, especificamente pela ação de íons Na⁺ e Cl⁻ encontrados normalmente em excesso em solos salinos (FLOWERS; MUNNS; COLMER, 2015).

Devido ao estresse salino, as plantas sofrem redução no crescimento e na produtividade, causada pela queda na atividade fotossintética (GHARBI et al, 2017), na assimilação de nutrientes (KEUTGEN; PAWELZIK, 2009) e na atividade de enzimas e proteínas, além dos danos causados pelo acúmulo de espécies reativas de oxigênio (AHANGER; AGARWAL, 2017).

Para as plantas se adaptarem ao estresse salino, é necessária a ativação de vários mecanismos específicos capazes de minimizar os efeitos negativos causados pelo excesso de sais no solo. O ajustamento osmótico é um deles, o qual permite a redução do seu potencial osmótico através do acúmulo de íons e solutos orgânicos fazendo com que se mantenha um gradiente de potencial hídrico favorável para absorver água e manter uma pressão de turgor (MUNNS et al., 2016).

Adicionalmente, a compartimentação de íons nos vacúolos, principalmente Na⁺ e Cl⁻, biossíntese de osmoprotetores, regulação de transporte (SHABALA; HARIADI; JACOBSEN, 2013) e/ou exclusão destes íons (KCHAOU et al., 2010) são mecanismos que contribuem para a tolerância à salinidade.

Dessa forma, o conhecimento sobre o potencial de cultivo de espécies que se desenvolvam bem em ambientes salinos é extremamente importante, principalmente quando se considera o estudo de mecanismos de tolerância que dão suporte à identificação de

genótipos capazes de se desenvolver em áreas salinizadas ou que necessitem do uso de irrigação com água de baixa qualidade.

Nesse contexto, o sorgo sacarino possui moderada tolerância ao estresse hídrico e salino (DALLA MARTA et al., 2014; ALMODARES; HADI; ARMADPOUR, 2008), o que favorece seu cultivo em áreas com este problema, principalmente quando o cultivo em condições salinas é inevitável.

O sorgo sacarino é um tipo de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench.) que possui significativa produção de biomassa, aproveitada como forragem para animais, alto valor nutricional dos grãos, utilizados na alimentação animal ou humana, e potencial energético elevado, principalmente quando associado à produção de etanol de segunda geração, obtidos a partir da biomassa lignocelulósica (DURÃES, 2011).

Atualmente, existe um interesse crescente no cultivo do sorgo sacarino no Brasil, sendo devido à possibilidade de colheita durante a entressafra da cana-de-açúcar. No entanto, é necessário estudar o potencial dessa cultura para produzir em áreas salinizadas, principalmente testando cultivares com alta capacidade de produção na região semiárida do país.

Nesse contexto, alguns estudos tem demonstrado produtividades significativas de genótipos de sorgo sacarino cultivados sob irrigação no semiárido nordestino. Tabosa et al. (2013), verificaram produtividades de 194 e 136 t ha⁻¹ das cultivares SF-15 e BR 506 cultivadas no município de Canindé do São Francisco- AL. Por sua vez, a cultivar 467-4-2 atingiu 116 t ha⁻¹ quando cultivada no município de Gararu-SE (CARVALHO; ARAGÃO, 1989).

Dessa forma, pretende-se com esse trabalho avaliar o efeito da salinidade sobre aspectos morfofisiológicos e nutricionais em cultivares de sorgo sacarino visando à identificação de genótipos promissores para utilização em áreas que apresentam problemas com a salinização dos solos, ou que não dispõem de água adequada para irrigação.

1.1 Hipóteses

O cultivo de sorgo sacarino é uma alternativa viável para produção em solos com problemas de salinidade ou em áreas que não disponham de água adequada para irrigação.

A análise do crescimento e dos aspectos fisiológicos e nutricionais são ferramentas úteis na identificação de cultivares de sorgo sacarino mais tolerantes à salinidade.

1.2 Objetivo Geral

Selecionar cultivares de sorgo sacarino mais tolerantes à salinidade com base em características morfofisiológicas e nutricionais visando à identificação de genótipos promissores para utilização em áreas salinizadas, ou que não disponham de água adequada para irrigação.

1.3 Objetivos específicos

- Selecionar cultivares de sorgo sacarino mais tolerantes à salinidade, com base em variáveis de crescimento a partir do uso de soluções salinas com diferentes valores de condutividade elétrica;
- Avaliar as respostas fisiológicas de cultivares de sorgo sacarino sob diferentes níveis de estresse salino;
- Avaliar o acúmulo e distribuição de macro e micronutrientes em cultivares de sorgo sacarino sob salinidade através do método de análise de componentes principais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma gramínea que apresenta um ciclo relativamente curto (até quatro meses) e com capacidade de acumular açúcares no colmo de forma similar à cana-de-açúcar (DURÃES, 2011). Essa cultura tem alto potencial energético, seja pela produção de etanol obtido por fermentação dos açúcares contidos nos colmos, ou de biocombustíveis de segunda geração obtidos a partir da biomassa lignocelulósica (BALLESTEROS et al., 2004).

Devido às potencialidades do sorgo sacarino, principalmente na produção de bioenergia, houve no Brasil uma enorme expansão na produção dessa cultura na década de 70, com a implementação do Pró-Álcool. Ao mesmo tempo, estudos de melhoramento genético foram iniciados para seleção de variedades mais promissoras, sendo intensificados mais recentemente após a criação do Plano Nacional de Agroenergia (PURCINO, 2011).

Atualmente, estima-se que três a cinco empresas produzam sementes de sorgo sacarino no país, sendo identificadas entre 30 e 50 usinas de etanol com grande interesse na utilização do sorgo sacarino em complemento à cana-de-açúcar (DURÃES, 2011). Na safra 2011/12 (nov-dez/mar-abr) foram plantados cerca de 20 mil hectares de sorgo sacarino, com rendimentos variáveis de 40 a 65 toneladas de biomassa e rendimento de 2 a 3 mil litros de etanol por hectare (DURÃES, 2011).

O interesse crescente no cultivo do sorgo sacarino é devido à possibilidade de colheita durante a entressafra da cana-de-açúcar, beneficiando a indústria sucroalcooleira ao fornecer matéria-prima para produção de etanol nesse período (PARRELLA et al., 2010). Dessa forma, áreas produtoras de cana-de-açúcar, localizadas principalmente na região Sudeste e Centro-Oeste, realizam a semeadura entre os meses de novembro e dezembro, programando-se a colheita entre março e abril, quando a cana-de-açúcar encontra-se inviável para o corte (MAY, 2011).

Sabe-se, ainda, que a cultura do sorgo sacarino é tolerante a determinados níveis de estresse hídrico e salino (DALLA MARTA et al., 2014; ALMODARES; HADI; ARMADPOUR, 2008), o que favorece sua utilização em áreas cujo problema é inevitável e limitam significativamente o desenvolvimento da cana-de-açúcar destinada à produção de etanol. Nessas condições, a biomassa do sorgo sacarino ainda pode ser aproveitada como forragem para animais, e os grãos produzidos podem ser utilizados na alimentação humana ou animal uma vez que apresentam características nutricionais similares às do milho (DURÃES, 2011).

Essas características respaldam a importância do cultivo de sorgo sacarino em regiões como o semiárido brasileiro, onde os baixos índices pluviométricos e as elevadas taxas de evapotranspiração favorecem a acumulação de sais no solo, limitando a produção de diversas culturas.

O excesso de sais no solo pode afetar significativamente o crescimento e produtividade das plantas devido a seus efeitos osmótico, iônico e nutricional. Segundo Tavakkoli et al. (2012), o efeito osmótico relaciona-se à dificuldade das plantas absorverem água devido à redução do potencial hídrico do solo; o efeito iônico é causado pela absorção em níveis tóxicos de íons como o Na^+ e Cl^- ; e os desequilíbrios nutricionais, com a redução da absorção de nutrientes, a exemplo do Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e NO_3^- , os quais competem com os íons que se encontram em excesso no solo, Na^+ e Cl^- .

A salinização do solo também pode ter um impacto negativo sobre a estabilidade estrutural e a condutividade hidráulica dos solos sensíveis devido à sodificação, isto é, ocorre aumento da proporção de adsorção de sódio e porcentagem de sódio trocável no solo, derivado da precipitação seletiva de minerais de cálcio concentrado na solução do solo (ARAGÜES et al., 2014).

Em resposta a essas condições de estresse, mecanismos são ativados pelas plantas de forma a promover a manutenção das funções celulares, como ajustamento osmótico (TÜRKAN; DEMIRAL, 2009), compartimentação de íons nos vacúolos ou sua exclusão por tecidos e órgãos (BAVEI; SHIRAN; ARZANI, 2011), síntese de solutos compatíveis (MISRA; SAXENA, 2009), manutenção na síntese de antioxidantes (COSTA et al., 2005), entre outros. Plantas que desenvolvem eficientemente um ou mais desses mecanismos, apresentam maior grau de tolerância ao estresse salino.

As vantagens da utilização de solutos compatíveis se devem à menor interferência nas reações bioquímicas normais, pois têm efeito mínimo no pH e no balanço de cargas do citosol e compartimentos lumenais das organelas, além de possuírem a habilidade de manter a integridade das membranas celulares e prevenir a desnaturação das proteínas, o que não acontece com a utilização de íons absorvidos do meio externo (OLIVEIRA; GOMES-FILHO; ENÉAS-FILHO, 2010).

A síntese e compartimentação de solutos compatíveis é um mecanismo importante, porém reflete em excessivos gastos de energia que poderiam ser economizados pela planta (FLOWERS; MUNNS; COLMER, 2015). A síntese desses compostos desviaria o suprimento de C e N necessário para o crescimento, por exemplo (FLOWERS; MUNNS; COLMER, 2015).

Como grandes quantidades de energia seriam necessárias para sintetizar esses compostos orgânicos em quantidades suficientes para ajustar o volume total de células, ocorre que a pressão evolutiva conduziu as plantas a utilizarem Na^+ e Cl^- como osmólitos em vacúolos enquanto impedem que esses íons atinjam concentrações tóxicas (FLOWERS; MUNNS; COLMER, 2015).

Segundo Almodares e Sharif (2007), o sorgo sacarino é considerado moderadamente tolerante à salinidade. Sua tolerância a estresses tem sido relacionada a suas características morfofisiológicas específicas e ao seu mecanismo fotossintético C_4 , que permite uma fixação eficiente de CO_2 e o grande acúmulo de matéria seca (DALLA MARTA et al., 2014).

Apesar de apresentar tolerância a determinados níveis de estresse salino, os mecanismos desenvolvidos pelo sorgo para resistir a essas condições resultam em um custo energético para a planta, o qual poderá refletir na redução do seu crescimento, como sua altura (VIEIRA et al., 2005), área foliar (ARAÚJO et al., 2010), teores de água (FERNANDES et al., 2011); decréscimo na acumulação e partição de matéria seca devido a sua influência sobre a assimilação de CO_2 , produção e distribuição de fotoassimilados (AQUINO; LACERDA; GOMES-FILHO, 2007).

Para evitar efeitos generalizados no desenvolvimento do sorgo, foi constatado que o valor limite de condutividade elétrica do extrato de saturação do solo deve ser de $6,8 \text{ dS m}^{-1}$ em plantas estabelecidas. Já os níveis de salinidade necessários para que ocorra uma redução de 50% tanto na emergência como na produção é de 13 a 15 dS m^{-1} , respectivamente (RHOADES; KANDIAH; MASHALI, 2000).

No entanto, o grau de tolerância do sorgo sacarino pode variar significativamente entre variedades e híbridos (IGARTUA; GRACIA; LASA, 1995; KRISHNAMURTHY et al., 2007). Branco et al. (2011), por exemplo, verificaram que plantas de sorgo sacarino sujeitas a concentrações salinas de 4 dS m^{-1} já apresentaram decréscimos muito pronunciados nas variáveis evapotranspiração (ET), condutância estomática (g_s), teor relativo em clorofilas e taxa de fotossíntese líquida (A), discordando dos valores determinados por Rhoades, Kandiah e Mashali (2000).

Diferenças quanto à tolerância à salinidade das variedades de sorgo sacarino Keller, Sofra e Kimia foram observadas por Almodares, Hadi e Armadpour (2008), sendo que as consideradas mais tolerantes apresentaram, ainda, maiores teores de sacarose em seus colmos.

Apesar de ser uma cultura que apresenta certa rusticidade, o sorgo é responsivo às boas práticas agrícolas (PURCINO, 2011), podendo ser exigente na nutrição mineral, sobretudo quando se busca alta produtividade (FRANCO, 2011).

Para atender a sua demanda nutricional, o transporte de nutrientes catiônicos através da membrana plasmática da planta é mediado por um gradiente eletroquímico de prótons gerados pelas H^+ -ATPases da membrana plasmática. Esse gradiente favorece o transporte por transportadores seletivos e não-seletivos de íons do tipo uniporte, simporte ou antiporte (PINTO; FERREIRA, 2015).

Nesse contexto, o aumento da concentração de íons na solução do solo, como Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , pode levar à competição entre nutrientes específicos devido à similaridade nos mecanismos de transporte para dentro da planta (MEHDI-TOUNSI et al., 2017; NIEVES-CORDONES et al., 2014).

Considera-se que plantas tolerantes a salinidade devem, promover o balanço nutricional de forma a manter quantidades satisfatórias de nutrientes em seus órgãos para manutenção de suas funções metabólicas.

Além disso, sabe-se que alguns nutrientes podem minimizar os efeitos causados pelo estresse salino, seja como N utilizado na síntese de compostos relacionados ao ajustamento osmótico (KEUTGEN; PAWELZIK, 2009), como K envolvido na ativação enzimática e regulação da absorção de Na e no metabolismo antioxidante (JAN et al., 2017), como Zn atuando no metabolismo antioxidante (WARAICH et al., 2011), ou como Ca, considerado um mensageiro intracelular em plantas, em resposta a estresses ambientais (REDDY et al., 2011).

Portanto, para maximizar o cultivo de sorgo sacarino sob salinidade, é importante manter o controle na concentração de sais do solo de modo que não interfira na absorção de nutrientes. Até porque, quanto maior a redução do potencial osmótico do solo, mais prejudicial será o estresse salino. Uma forma de manter esse controle é através da aplicação de uma lâmina de lixiviação (CARVALHO et al., 2016).

A lâmina de lixiviação para balanço de sais representa a fração da água de irrigação que deve atravessar a zona das raízes (PETERSEN, 1996). Essa fração de água vai depender do seu nível de salinidade e da tolerância das plantas cultivadas e deve ser acrescentada à lâmina de irrigação.

Para estabelecer a lâmina de irrigação deve-se conhecer o volume de água perdido por evapotranspiração da cultura. O processo evapotranspirativo é regulado por trocas de energia na superfície da cobertura do solo e vegetal, sendo limitado pela quantidade de energia disponível (BORGES et al., 2008).

No entanto, o excesso de sais no solo interfere diretamente na redução da taxa de evapotranspiração, devido à menor disponibilidade de água para a planta sob estresse salino.

Com o manejo adequado da irrigação associado ao uso de uma cultura capaz de se desenvolver em áreas salinizadas, pode-se minimizar os impactos causados pelo acúmulo de sais ao controlar sua ascensão até a superfície a partir das irrigações (CARVALHO et al., 2016) e com a redução da evaporação de água do solo ao ser recoberto pela cultura (CAMPOS et al., 1994).

É importante ressaltar o papel desenvolvido pelo sistema radicular do sorgo sacarino, contribuindo tanto na extração de sais do solo, como também para aumento da porosidade e permeabilidade com o crescimento das raízes (HOLANDA et al., 2007), além de sua participação no incremento dos teores de matéria orgânica do solo.

Diante do exposto, verifica-se a relevância da realização de estudos voltados para a identificação e caracterização de genótipos cada vez mais tolerantes à salinidade e com alto potencial produtivo. Dessa forma, o sorgo sacarino pode ser uma alternativa viável para ser cultivado em áreas salinizadas, principalmente quando se considera o seu alto potencial produtivo para produção de etanol, cuja produção é considerável na região do submédio do Vale do São Francisco, e vem decaindo devido à salinização dos solos.

REFERÊNCIAS

AHANGER, M. A.; AGARWAL, R. M. Salinity stress induced alterations in antioxidant metabolism and nitrogen assimilation in wheat (*Triticum aestivum* L.) as influenced by potassium supplementation. **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 115, p. 449-460, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.04.017>>.

ALMODARES, A; HADI, M. R.; ARMADPOUR, H. Sorghum stem yield and soluble carbohydrates under different salinity levels. **African Journal of Biotechnology**, Ebène, v. 7, n. 22, p. 4051-4055, 2008. Disponível em:<<https://doi.org/10.5897/AJB08.156>>.

ALMODARES, A; SHARIF, M. E. Effects of irrigation water qualities on biomass and sugar contents of sugar beet and sweet sorghum cultivars. **Journal of Environmental Biology**, Lucknow, v. 28, n. 2, p. 213-218, 2007.

AQUINO, A. J. S.; LACERDA, C. F.; GOMES-FILHO, E. Crescimento, partição de matéria seca e retenção de Na⁺, K⁺ e Cl⁻ em dois genótipos de sorgo irrigados com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 961-971, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000500013>>.

ARAGÜES, R.; MEDINA, E. T.; CLAVERÍA, I.; MARTÍNEZ-COB, A.; FACI, J. Regulated deficit irrigation, soil salinization and soil sodification in a table grape vineyard drip-irrigated with moderately saline waters. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 134, p. 84-93, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.019>>.

- ARAÚJO, C. A. S.; RUIZ, H. A.; CAMBRAIA, J. NEVES, J. C. L.; FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J. Seleção varietal de *Phaseolus vulgaris* quanto à tolerância ao estresse salino com base em variáveis de crescimento. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 1, p. 132-139, 2010. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2010000100021>>.
- BALLESTEROS, M.; OLIVA, J. M.; NEGRO, M. J.; MANZANARES, P.; BALLESTEROS, I. Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process (SFS) with *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875. **Process Biochemistry**, Amsterdam, v. 39, p. 1843–1848, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.09.011>>.
- BAVEI, V.; SHIRAN, B.; ARZANI, A. Evaluation of salinity tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) using ion accumulation, proline and peroxidase criteria. **Plant Growth Regulation**, Amsterdam, v. 64, n. 3, p. 275-285, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10725-011-9568-z>>.
- BORGES, C. J. R.; AZEVEDO, P. V. de; SILVA, V. de P. R.; CAMPOS, J. H. B. da C.; MOURA, M. S. B. de; SOARES, J. M.; SILVA, B. B. da. Influência do calor armazenado o sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 393-399, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000400010> >.
- BRANCO, J. C.; COELHO, R.; SANTOS, F. L.; GOMES, D. O.; GONÇALVES, M. C. **Interação entre salinidade e fertilização azotada em sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* L. Moench)**. In: CONGRESSO IBÉRICO DE AGRO-ENGENHARIA, 21, Évora, Portugal, 2011. Anais... Portugal, Universidade de Évora, p.1-11, 2011.
- CAMPOS, B-H. C.; REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; NICOLODI, R. Avaliação temporal da umidade do solo como consequência do tipo e percentagem de cobertura vegetal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 459-463, 1994. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84781994000300002> >.
- CARVALHO, H. W. L.; ARAGÃO, W. M. **Comportamento de progênes avançadas em Nossa Senhora da Glória, Gararu e Propriá**. In: _____. Avaliação de cultivares de sorgo forrageiro no Estado de Sergipe. Aracaju: EMBRAPA – CNPCO, 1989. 29 p. (Boletim de Pesquisa, 4).
- CARVALHO, J. F.; SILVA, E. F. F.; SILVA, G. F.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Production components of *Vigna unguiculata* (L. Walp) irrigated with brackish water under different leaching fractions. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 39, n. 4, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252016v29n422rc>>.
- COSTA, P. H. A.; AZEVEDO-NETO, A. D.; BEZERRA, M. A.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Antioxidant-enzymatic system of two sorghum genotypes differing in salt tolerance. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, São Paulo, v. 17, n. 4, p. 353-361, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202005000400003>>.
- DALLA MARTA, A.; MANCINI, M.; ORLANDO, F.; NATALI, F.; CAPECCHI, L.; ORLANDINI, S. Sweet sorghum for bioethanol production: crop responses to different water stress levels. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 64, p. 211-219, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.033>>.

DURÃES, F. O. M. **Sorgo sacarino: Desenvolvimento de tecnologia agronômica**. In: EMBRAPA AGROENERGIA. Sorgo sacarino: tecnologia agronômica e industrial para a produção de alimentos e energia. Brasília: Agroenergia em Revista, ano II, n. 3, p. 7, 2011.

FERNANDES, P. D.; BRITO, M. E. B.; GHEYI, H. R.; SOARES-FILHO, W. S.; MELO, A. S.; CARNEIRO, P. T. Crescimento de híbridos e variedades porta-enxerto de citros sob salinidade. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 259-267, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.5582>>

FLOWERS, T. J.; MUNNS, R.; COLMER, T. D. Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. **Annals of Botany**, Oxford, v. 115, n. 3, p. 419-31, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/aob/mcu217>>.

FRANCO, A. A. N. **Marcha de absorção e acúmulo de nutrientes na cultura do sorgo**. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido) - Universidade Federal de Montes Claros, Janaúba, MG, 2011.

GHARBI, E.; MATÍNEZ, J. P.; BENAHMED, H.; HICHRI, I.; DOBREV, P. I.; MOTYKA, V.; QUINET, M.; LUTTS, S. Phytohormone profiling in relation to osmotic adjustment in NaCl-treated plants of the halophyte tomato wild relative species *Solanum chilense* comparatively to the cultivated glycophyte *Solanum lycopersicum*. **Plant Science**, Amsterdam, v. 258, p. 77-89, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.02.006>>.

HOLANDA, A. C.; SANTOS, R. V.; SOUTO, J. S.; ALVES, A. R. Desenvolvimento inicial de espécies arbóreas em ambientes degradados por sais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, São Cristóvão, v.7, p. 39-50, 2007.

IGARTUA, E.; GRACIA, M. P.; LASA, J. M. Characterization and genetic control of germination, emergence responses of grain sorghum to salinity. **Euphytica**, Amsterdam, v. 76, n. 3, p. 185-193, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00022163>>.

JAN, A. U.; HADI, F.; MIDRARULLAH; NAWAZ, M. A.; HAHMAN, K. Potassium and zinc increase tolerance to salt stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 166, p. 139–149, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.008>>.

KCHAOU, H.; LARBI, A.; GARGOURI, K.; CHAIEB, M.; MORALES, F.; MSALLEM, M. Assessment of tolerance to NaCl salinity of five olive cultivars based on growth characteristics and Na⁺ e Cl⁻ exclusion mechanisms. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v.124, n. 3, p. 306-305, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.01.007>>.

KEUTGEN, A. J.; PAWELZIK, E. Impacts of NaCl stress on plant growth and mineral nutrient assimilation in two cultivars of strawberry. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 65, n. 2-3, p. 170-176, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.08.002>>.

KRISHNAMURTHY, L.; SERRAJ, R.; HASH, C. T.; DAKHEEL, A. J.; REDDY, B. V. S. Screening sorghum genotypes for salinity tolerant biomass production. **Euphytica**, Amsterdam, v. 156, p. 15–24, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10681-006-9343-9>>.

MAY, A. **Boas práticas agrícolas para o cultivo de sorgo sacarino**. In: EMBRAPA AGROENERGIA. Sorgo sacarino: tecnologia agronômica e industrial para a produção de alimentos e energia. Brasília: Agroenergia em Revista, ano II, n. 3, p. 16-17, 2011.

MEHDI-TOUNSI, H.; CHELLI-CHAABOUNI, A.; MAHJOUR-BOUJNAH, D.; BOUKHRIS, M. Long-term Field response of pistachio to irrigation water salinity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 185, p. 1-12, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.003>>.

MISRA, N.; SAXENA, P. Effect of salicylic acid on proline metabolism in lentil grown under salinity stress. **Plant Science**, Amsterdam, v. 177, n. 3, p. 181-189, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.05.007>>.

MUNNS, R.; JAMES, R.A.; GILLIHAM, M.; FLOWERS, T. J.; COLMER, T. D. Tissue tolerance: an essential but elusive trait for salt-tolerant crops. **Functional Plant Biology**, Melbourne, v. 43, n. 12, p. 1103-1113, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1071/FP16187>>.

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

NIEVES-CORDONES, M.; ALEMAN, F.; MARTINEZ, V.; RUBIO, F. K⁺ uptake in plant roots. The systems involved, their regulation and parallels in other organisms. **Journal Plant Physiology**, Amsterdam, v. 171, p. 688-695, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.09.021>>.

OLIVEIRA, A. B.; GOMES-FILHO, E.; ENÉAS-FILHO, J. O problema da salinidade na agricultura e as adaptações das plantas ao estresse salino. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 6, n. 11, p.1-16, 2010.

PARRELLA, R. A. C.; MENEGUCI, J. L. P.; RIBEIRO, A.; SILVA, A. R.; PARRELLA, N. N. L. D.; RODRIGUES, J. A. S.; TARDIM, F. D.; SCHAFFERT, R. E. **Desempenho de cultivares de sorgo sacarino em diversos ambientes visando produção de etanol**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 28, Goiânia, GO, 2010. Anais... Goiânia: ABMS, p. 256-263, 2010.

PETERSEN, F. H. **Water testing and interpretation**. In: REED, D.W. (Ed.) Water media, and nutrition for greenhouse crops. Batavia: Ball, p.31-49, 1996.

PINTO, E.; FERREIRA, I. P. L. V. O. Cation transporters/channels in plants: Tools for nutrient biofortification. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 179, p. 64-82, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2015.02.010>>.

PURCINO, A. A. C. **Sorgo sacarino na Embrapa: histórico, importância e usos.** In: EMBRAPA AGROENERGIA. Sorgo sacarino: tecnologia agrônômica e industrial para a produção de alimentos e energia. Brasília: Agroenergia em Revista, ano II, n. 3, p. 5, 2011.

REDDY, A. S.; ALI, G. S.; CELESNIK, H.; DAY, I. S. Coping with stresses. Roles of calcium- and calcium/calmodulin-regulated gene expression. **Plant Cell**, Rockville, v. 23, p. 2010-2032, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1105/tpc.111.084988>>.

REDDY, S. J.; AMORIM NETO, M. S. **Dados de precipitação, evapotranspiração potencial, radiação solar global de alguns locais e classificação climática do Nordeste do Brasil.** Petrolina: EMBRAPA/CPATSA, 280p, 1983.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola.** Tradução de H. R. GHERI, J. R. de SOUZA, J. E. QUEIROZ. Campina Grande: UFPB, 2000. 27 p. (FAO. Estudos Irrigação e Drenagem, 48).

SHABALA, S.; HARIADI, Y.; JACOBSEN, S. E. Genotypic difference in salinity tolerance in quinoa is determined by differential control of xylem Na⁺ loading and stomatal density. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 170, n. 10, p. 906-914, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.01.014>>.

TABOSA, J. N.; BARROS, A. H. C.; BRITO, A. R. M. B.; SIMPLÍCIO, J. B. **Cultivo de sorgo no semiárido brasileiro: Potencialidades e utilizações.** In: FIGUEIREDO, M. V. B. et al. (Ed.). Tecnologias potenciais para uma agricultura sustentável. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco – IPA/Emater/SEAGRI-AL, p. 133-162, 2013.

TAVAKKOLI, E.; PAULL, J.; RENGASAMY, P.; McDONALD, G. K. Comparing genotypic variation in faba bean (*Vicia faba* L.) in response to salinity in hydroponic and field experiments. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 127, n. 1, p. 99-108, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.01.014>>.

TÜRKAN, I.; DEMIRAL, T. Recent developments in understanding salinity tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 2-9, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.05.008>>.

VIEIRA, M. R.; LACERDA, C. F.; CÂNDIDO, M. J. D.; CARVALHO, P. L.; COSTA, R. N. T.; TABOSA, J. N. Produtividade e qualidade da forragem de sorgo irrigado com águas salinas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, suppl, p. 42-46, 2005.

WARAICH, E. A., AMAD, R., ASHRAF, M. Y., SAIFULLAH, AHMAD, M. Improving agricultural water use efficiency by nutrient management. **Soil & Plant Science**, Abingdon, v. 61, n. 4, p. 291-304, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2010.491954>>.

3 CRESCIMENTO DE CULTIVARES DE SORGO SACARINO IRRIGADAS COM ÁGUAS SALINAS

Crescimento de cultivares de sorgo sacarino irrigadas com águas salinas

Resumo

A degradação de solos no semiárido pela salinização tem reduzido a potencialidade de seu uso agropecuário. Uma das alternativas mais viáveis para cultivo de plantas nessas áreas tem sido a seleção de genótipos tolerantes ao estresse salino. O objetivo do presente estudo foi identificar cultivares de sorgo sacarino com maior potencial de crescimento sob salinidade. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando delineamento experimental em blocos casualizados, em esquema fatorial 6 x 5. Foram testadas seis cultivares (BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2), soluções salinas com cinco valores de condutividade elétrica (0,0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12,0 dS m⁻¹), em três repetições. As variáveis avaliadas foram altura da planta, diâmetro do colmo, matéria fresca e seca da parte aérea, conteúdo de água dos colmos, teor de sólidos solúveis totais, área foliar específica e matéria seca das folhas. As cultivares, exceto Willey, tiveram decréscimos de produção inferior a 50% para CE_a até 7,0 dS m⁻¹. As cultivares BR 506, TF-17 e 467-4-2 foram mais produtivas, sendo que 467-4-2 e BR 506 ainda apresentaram maiores teores de sólidos solúveis em seus colmos.

Palavras-chave: Salinidade. *Sorghum bicolor*. Semiárido.

Growth of sweet sorghum cultivars irrigated with saline waters

Abstract

Soil degradation in semiarid by salinization has decreased agricultural use potential around the world. One of the most viable alternatives for plant cultivation in these areas has been the selection of genotypes tolerant to salt stress. The aim of this study was to identify sweet sorghum cultivars with higher growth potential under salinity. The experiment was performed in greenhouse using a randomized block design in a 6 x 5 factorial. Six cultivars (BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 and 467-4-2) and saline solutions with five values of electrical conductivity (0.0, 1.5, 3.0, 7.0 and 12.0 dS m⁻¹) were tested with three replicates. The evaluated variables were plant height, stem diameter, fresh and dry matter of shoot, stem water content, total soluble solids content, specific leaf area and leaf dry matter. The cultivars, except for Willey, have a production decrease of less than 50% for CE_a up to 7.0 dS m⁻¹. BR 506, TF-17 and 467-4-2 cultivars were the most productive, with 467-4-2 and BR 506 still showing higher soluble solids contents in their stems.

Keywords: Salinity. *Sorghum bicolor*. Semiarid.

3.1 Introdução

A salinização de áreas agrícolas em regiões áridas e semiáridas tem-se tornado um problema cada vez mais grave, reduzindo a capacidade produtiva e sustentabilidade desses locais. Neste contexto, o cultivo de sorgo sacarino pode ser uma alternativa viável devido a sua rusticidade e tolerância a estresses ambientais.

O sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma gramínea de ciclo relativamente curto e com capacidade de acumular açúcares no colmo de forma semelhante à cana-de-açúcar (DURÃES, 2011).

Entre as principais características desta cultura tem-se a elevada produção de biomassa, com alto valor nutricional dos grãos, sendo utilizada na alimentação animal e humana (DURÃES, 2011). Também tem potencial energético, principalmente quando associada à produção de etanol de segunda geração, obtido a partir da biomassa lignocelulósica (REIS et al., 2016).

O sorgo sacarino possui moderada tolerância ao estresse hídrico e salino (DALLA MARTA et al., 2014; ALMODARES et al., 2008). A tolerância das plantas à salinidade está relacionada com o desenvolvimento de mecanismos específicos que contribuem para a minimização do estresse salino, como o ajustamento osmótico, redução dos efeitos de toxidez de íons Na^+ e Cl^- e manutenção do equilíbrio nutricional (TAVAKKOLI; RENGASAMY; McDONALD, 2010).

Os mecanismos desenvolvidos pelas plantas para resistir aos efeitos da salinidade normalmente resultam em um custo energético, podendo refletir na redução do seu crescimento, como sua altura (VIEIRA et al., 2005), área foliar (ARAÚJO et al., 2010), teores de água (FERNANDES et al., 2011). Também é relatado decréscimo na acumulação e partição de matéria seca, devido à influência destes mecanismos sobre a assimilação de CO_2 , produção e distribuição de fotoassimilados (AQUINO; LACERDA; GOMES-FILHO, 2007).

Para evitar efeitos generalizados no desenvolvimento do sorgo, sugere-se que o valor limite de condutividade elétrica do extrato de saturação do solo seja de $6,8 \text{ dS m}^{-1}$ em plantas estabelecidas. Já os níveis de salinidade necessários para que ocorra uma redução de 50%, tanto na emergência como na produção, é de 13 a 15 dS m^{-1} , respectivamente (RHOADES; KANDIAH; MASHALI, 2000).

No entanto, além da interferência de fatores ambientais, o grau de tolerância do sorgo sacarino pode variar significativamente entre variedades e híbridos (IGARTUA; GRACIA; LASA, 1995; KRISHNAMURTHY et al., 2007). Dessa forma, o objetivo do presente estudo

foi de identificar cultivares de sorgo sacarino com maior potencial de crescimento sob salinidade.

3.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação não climatizada da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro-BA (09°24'41"S/40°30'57"W, 368 m). A região apresenta clima tropical semiárido, com precipitação média anual de 400 mm, umidade relativa média do ar de 67,8%, temperatura média de 26,5°C e velocidade do vento de 2,3 m s⁻¹ (REDDY; AMORIM NETO, 1983).

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 6 x 5, com seis cultivares de sorgo sacarino e cinco níveis de salinidade, em três repetições. As cultivares utilizadas foram: BR 506 e Willey, desenvolvidas pela Embrapa Milho e Sorgo, SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2 pertencentes ao banco de germoplasma do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA). Os níveis de salinidade foram representados por cinco valores de condutividade elétrica da água de irrigação (CE_a): 0,0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12,0 dS m⁻¹.

O cultivo foi realizado em vasos plásticos com capacidade para 20 litros, sendo preenchidos, inicialmente, com uma camada de 2 cm de brita e, em seguida, 15 kg de uma amostra de ARGISSOLO AMARELO Distrófico latossólico, de textura média, coletado na camada de 0,0 a 0,2 m, cujas características químicas e granulométricas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química e granulométrica do solo utilizado para o cultivo de sorgo sacarino sob diferentes níveis de salinidade

C.O. g kg ⁻¹	pH (1:2,5)	CE _{es} dS m ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	S	H+Al	T
1,9	5,7	0,23	1,0	0,7	0,07	0,33	0,0	2,1	1,6	3,7
V	P	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Areia	Silte	Argila	
%	mg dm ⁻³		mg dm ⁻³				g kg ⁻¹			
57	17	0,5	67,9	32,7	6,1	0,19	847	135	18	

C.O. - carbono orgânico (método Walkley-Black); CE_{es} - condutividade elétrica do extrato de saturação; Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ (extração em KCl 1 mol L⁻¹); H+Al [extração em Ca (C₂H₃O₂)₂, 1 mol L⁻¹, pH 7,0]; Na⁺, K⁺, P, Cu, Fe, Mn e Zn (extração por Mehlich-1); B (extração em água quente); S - soma de bases; T - capacidade de troca de cátions [S+(H+Al)]; V - saturação por bases.

Para manejo da irrigação, foram instalados lisímetros de pesagem em todos os vasos de um bloco. Os lisímetros foram equipados com células de carga (modelo TSD, AEPH,

capacidade de 50 kg) instaladas sob uma plataforma metálica com dispositivo de coleta do excesso de água drenado. As células de carga foram conectadas a dois multiplexadores (AM16/32B, Campbell Scientific) ligados a um datalogger (CR1000, Campbell Scientific), o qual registrou leituras a cada 15 minutos. A calibração do equipamento foi realizada a partir de leituras de sinal (mV) após aplicações sucessivas de volume de água conhecido até atingir a capacidade de campo.

A semeadura foi realizada colocando-se cinco sementes por vaso, na profundidade de 2 cm. Duas semanas após a semeadura foi realizado o desbaste, deixando uma planta por vaso e iniciadas as irrigações com as soluções salinas. As soluções foram preparadas a partir dos sais NaCl, CaCl₂.2H₂O e MgSO₄.7H₂O, de modo a se obter proporção equivalente entre Na:Ca:Mg de 7:2:1 (AQUINO; LACERDA; GOMES-FILHO, 2007).

As irrigações foram realizadas a cada 48 horas, com a reposição do volume de água evapotranspirado durante este período, acrescido de 15% como fração de lixiviação.

Para correção da fertilidade do solo foram feitas aplicações de 500 mL de solução nutritiva, contendo 160, 400, 210, 150, 50 e 180 mg L⁻¹ de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, e 0,81; 1,33; 0,15; 3,66; 4,0; 0,1 mg L⁻¹ dos respectivos micronutrientes B, Cu, Mo, Mn, Zn e Fe (ALVAREZ V., 1974). As fontes utilizadas foram (NH₄)₂SO₄, KH₂PO₄, Na₂HPO₄.H₂O, Ca(NO₃)₂, MgSO₄, CaCl₂.2H₂O, H₃BO₃, CuSO₄.5H₂O, (NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O, MnSO₄.H₂O, ZnSO₄.H₂O, FeSO₄.7H₂O e NaEDTA. A aplicação de nutrientes foi iniciada após o desbaste e realizada em três parcelas com intervalos de vinte dias.

O crescimento do sorgo foi dividido em três fases: EC1 – entre a germinação e a iniciação da panícula; EC2 – entre a iniciação da panícula e o florescimento, ocorrendo rápido alongamento do colmo e panícula, também chamada de “emborrachamento”; e EC3 – do florescimento até o amadurecimento dos grãos (TABOSA, 2011).

Foram realizadas medidas de altura das plantas a cada 15 dias, a partir da primeira quinzena (início da aplicação das soluções salinas) até o final do experimento. A coleta das plantas foi realizada aos 75, 97 e 105 dias após o plantio, considerando o ponto de colheita das cultivares, no qual os grãos da porção central das panículas adquiriram aspecto entre pastoso e farináceo.

Durante a colheita, foram feitas medidas de altura da planta (Ht), diâmetro do colmo (\emptyset), comprimento (C) e largura (L) da folha +3, número de folhas vivas e perfilhos (NPf). O colmo foi seccionado na porção central, para leitura dos sólidos solúveis totais (°Brix) do caldo através do uso de um refratômetro portátil. As plantas foram separadas em folhas, colmos, panículas, raízes, perfilhos e pesadas para obtenção da matéria fresca.

Posteriormente, o material foi colocado em estufa para secar a 60 °C, para determinação da matéria seca.

As matérias fresca (MFPA) e seca (MSPA) da parte aérea foram calculadas a partir da soma das massas de folhas, colmos, panículas e perfilhos.

A partir dos valores de matéria fresca (MFc) e seca (MSc) dos colmos, em gramas, foi calculado o conteúdo de água (CA) a partir da fórmula:

$$CA (g)=MFc - MSc$$

A área foliar (AF) foi estimada a partir do comprimento (C) e largura (L) da folha +3, em centímetros, conforme fórmula utilizada por Coelho (2013):

$$AF (cm^2)=0,7811xCxL-14,964 \quad R^2=0,98$$

Através dos resultados de AF, número de folhas (Nf) e matéria seca das folhas (MSf), foi calculada a área foliar específica (AFE) através da fórmula:

$$AFE (cm^2 g^{-1}) = \frac{AF \times Nf}{MSf}$$

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância utilizando o programa Sisvar 5.6 (FERREIRA, 2011). Para comparação entre os níveis de salinidade foram utilizados modelos de regressão de primeiro e segundo grau, quando significativos ao nível de 1 ou 5% de probabilidade. Para comparação entre cultivares foi realizado o teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

3.3 Resultados

A interação entre as cultivares e a CE_a foi significativa para as variáveis altura da planta (Ht), diâmetro do colmo (\emptyset), matéria fresca (MFPA) e seca da parte aérea (MSPA), conteúdo de água (CA) dos colmos e sólidos solúveis totais (SST). A área foliar específica (AFE) e a matéria seca das folhas foram influenciadas pelo efeito independente das cultivares e dos níveis de salinidade, enquanto que o número de perfilhos (NPf) foi uma característica que diferiu apenas entre cultivares, não sendo influenciada pelos níveis de salinidade.

As cultivares de sorgo sacarino tiveram diferenças em relação à duração de seu ciclo, associada à característica de cada cultivar e ao efeito da salinidade no retardamento ou impedimento da sua maturação.

As cultivares BR 506 e Willey foram consideradas precoces, com estádios fenológicos definidos em EC1, até 45 dias após o plantio (DAP), EC2, entre 45 e 60 DAP e, EC3, entre 60 e 75 DAP. As cultivares SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2 foram consideradas tardias, com EC1

encerrando em até 75 DAP, EC2 variando de 70 a 90 DAP e, EC3 encerrando até 105 DAP (Figura 1).

As cultivares BR 506 (Figura 1A) e Willey (Figura 1B) tiveram duração total do ciclo de 75 dias, independente dos níveis de salinidade impostos. As plantas da cultivar SF-11 irrigadas com água com CE_a de 1,5 a 12 $dS\ m^{-1}$ (Figura 1C) e as cultivares SF-15 e TF-17 submetidas à CE_a de 7,0 a 12 $dS\ m^{-1}$ (Figuras 1D e 1E) tiveram seu ciclo em 105 dias, enquanto que as demais plantas destas cultivares foram colhidas com 97 dias após o plantio.

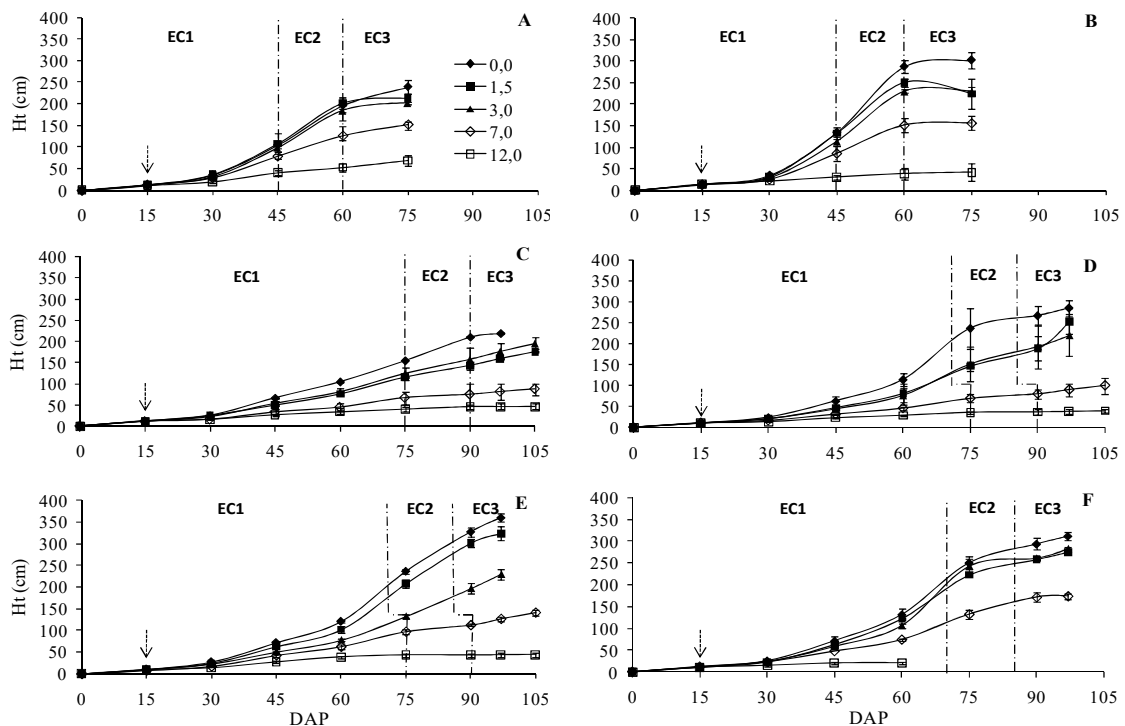


Figura 1- Altura das plantas (Ht) de sorgo sacarino a cada 15 dias após o plantio (DAP) das cultivares BR 506 (A), Willey (B), SF-11 (C), SF-15 (D), TF-17 (E), 467-4-2 (F), submetidas a diferentes níveis de salinidade (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 $dS\ m^{-1}$) da água de irrigação. Seta indica início da aplicação das soluções salinas. EC1, EC2 e EC3 indicam os estádios de crescimento da cultivar, finalizando na colheita

Com aplicação das soluções salinas, foi possível observar diferenças entre os tratamentos a partir dos 45 DAP, principalmente para a cultivar Willey. Plantas submetidas à CE_a de 12 $dS\ m^{-1}$, independente da cultivar, sofreram estresse salino severo, havendo elevada redução de sua altura. No caso da cultivar 467-4-2, as plantas morreram com 67 dias após o plantio (Figura 1F).

A altura das plantas decresceu linearmente com o aumento da salinidade para as cultivares BR 506, Willey, SF-11 e SF-15 (Figura 2), no entanto, para BR 506 a altura das plantas foi menos sensível ao estresse salino, pois apresentou menor declive. Para as cultivares citadas, a redução de 50% da altura foi com as CE_a de 8,63; 7,16; 7,25; 6,61 $dS\ m^{-1}$, respectivamente.

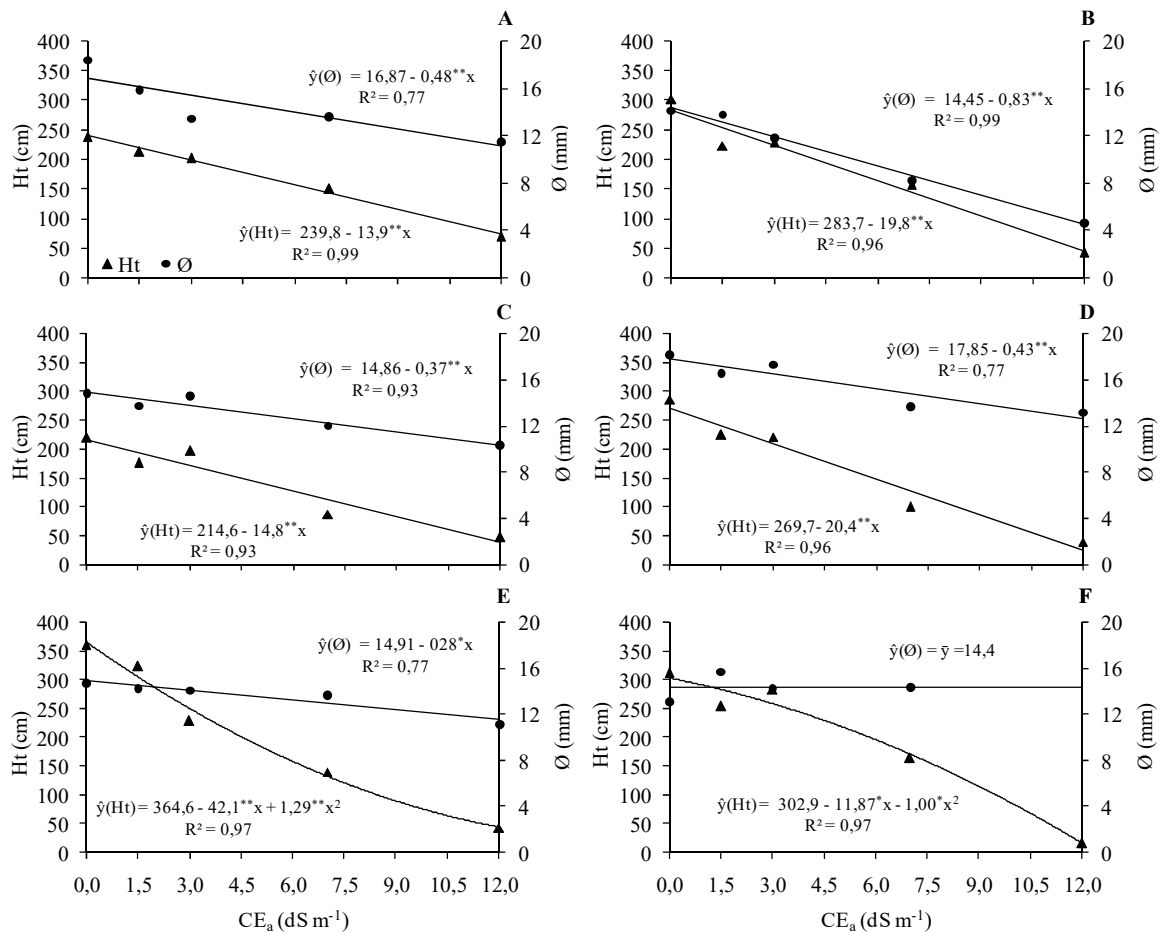


Figura 2 - Altura das plantas (Ht) e diâmetro do colmo (\varnothing) das cultivares de sorgo sacarino BR 506 (A), Willey (B), SF-11 (C), SF-15 (D), TF-17 (E), 467-4-2 (F), submetidas a diferentes níveis de salinidade (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 $dS\ m^{-1}$) da água de irrigação. Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**) e $p < 0,05$ (*)

Para as cultivares TF-17 e 467-4-2, a redução da altura devido ao aumento da salinidade foi representada por uma regressão de segundo grau (Figuras 2E e 2F). A redução de 50% da altura das plantas da cultivar TF-17 ocorreu para a CE_a de 5,14 $dS\ m^{-1}$, enquanto que para 467-4-2, a CE_a foi de 7,73 $dS\ m^{-1}$.

O diâmetro do colmo apresentou baixa sensibilidade aos efeitos da salinidade para as cultivares estudadas, com exceção da Willey, com redução de 50% na CE_a de 8,7 $dS\ m^{-1}$

(Figura 2B). Para as cultivares BR 506 (A), SF-11 (C), SF-15 (D) e TF-17 (E), as reduções foram de 0,48; 0,37; 0,43 e 0,28 mm para cada acréscimo de 1dS m^{-1} da CE_a . Para 467-4-2, não foram observadas diferenças no diâmetro do colmo das plantas até a CE_a de $7,0\text{ dS m}^{-1}$.

Com relação às matérias fresca (MFPA) e seca (MSPA) da parte aérea (Figura 3) também se observou redução significativa com o aumento da salinidade para todas as cultivares. A redução de 50% da MFPA das cultivares BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2 ocorreu respectivamente para as CE_a de 8,18; 6,53; 8,42; 7,38; 7,77 e $9,39\text{ dS m}^{-1}$. Para MSPA, sua redução em 50% nas cultivares citadas foram para as CE_a de 7,15; 6,80; 7,21; 7,11; 7,28 e $8,34\text{ dS m}^{-1}$, respectivamente.

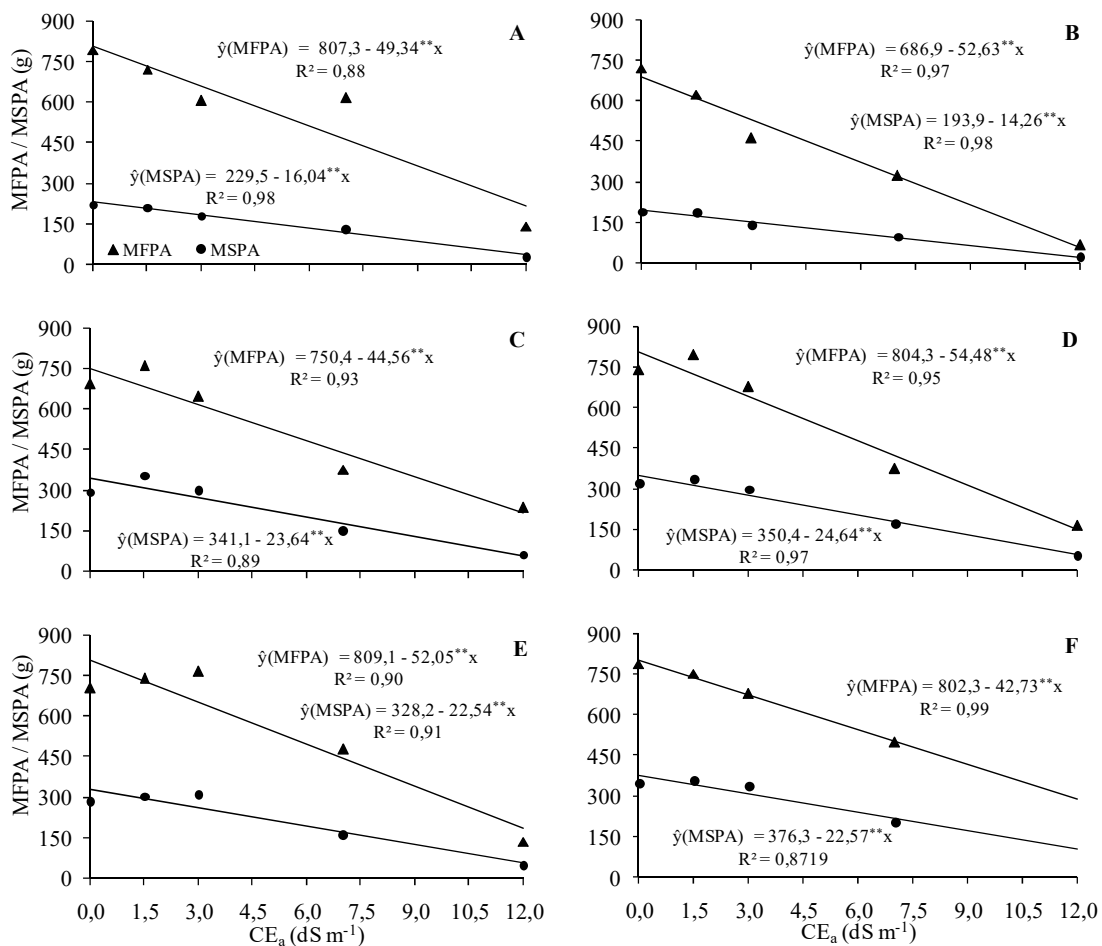


Figura 3 - Matérias fresca (MFPA) e seca da parte aérea (MSPA) das cultivares de sorgo sacarino BR 506 (A), Willey (B), SF-11 (C), SF-15 (D), TF-17 (E), 467-4-2 (F), submetidas a diferentes níveis de salinidade (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 dS m^{-1}) da água de irrigação. Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**)

O conteúdo de água (CA) dos colmos das cultivares estudadas reduziu de forma linear com o aumento da salinidade, exceto para Willey (Figura 4). A redução de 50% de CA

ocorreu para as CE_a de 7,27; 4,31; 7,64; 7,86; 7,93 e 6,83 $dS\ m^{-1}$ para as cultivares BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2, respectivamente.

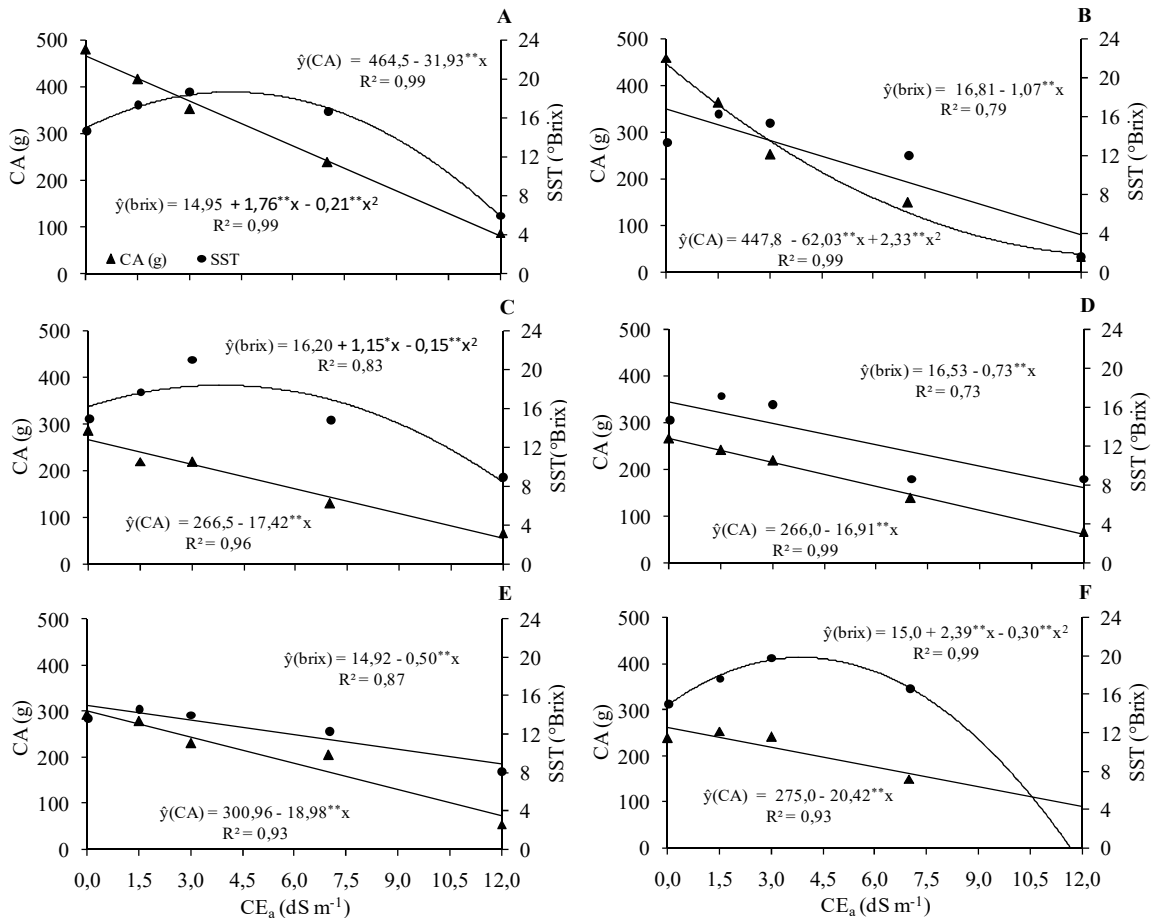


Figura 4 - Conteúdo de água (CA) dos colmos e sólidos solúveis totais (°Brix) nos colmos das respectivas cultivares de sorgo sacarina: BR 506 (A), Willey (B), SF-11 (C), SF-15 (D), TF-17 (E), 467-4-2 (F), submetidas a diferentes níveis de salinidade (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 $dS\ m^{-1}$) da água de irrigação. Coeficientes da regressão significativos, com $p < 0,01$ (**) e $p < 0,05$ (*)

Considerando os teores de sólidos solúveis totais (SST), representados pelo °Brix do caldo, constatou-se que as cultivares Willey, SF-15 e TF-17, apresentaram redução de respectivamente 1,07; 0,73 e 0,50 °Brix para cada incremento de 1,0 $dS\ m^{-1}$ da CE_a . No entanto, para valores de CE_a mais baixos houve aumento no °Brix do caldo das cultivares BR 506, SF-11 e 467-4-2, atingindo valores máximos de SST de 18,8; 18,4 e 19,8 °Brix para as CE_a de 4,2; 3,9 e 4,0 $dS\ m^{-1}$, respectivamente

As cultivares BR 506 e Willey tiveram menor acúmulo de matéria seca da parte aérea em comparação com as demais cultivares, quando irrigadas com água de CE_a até 3,0 $dS\ m^{-1}$ (Tabela 2). No entanto, o conteúdo de água (CA) dos colmos foi superior nessas duas cultivares quando submetidas à CE_a de até 1,5 $dS\ m^{-1}$. O CA dos colmos da BR 506 ainda foi

maior que nas demais cultivares na CE_a de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, e igualmente superior à TF-17 quando comparado às demais cultivares na CE_a de $7,0 \text{ dS m}^{-1}$. Para a CE_a de 12 dS m^{-1} , as cultivares foram afetadas, de forma a não apresentarem diferenças significativas entre si, e a 467-4-2 não sobreviveu.

Tabela 2 - Matéria seca da parte aérea (MSPA) e do conteúdo de água (CA) dos colmos entre cultivares de sorgo sacarino para cada nível de salinidade

Cultivar	CE_a (dS m^{-1})				
	0,0	1,5	3,0	7,0	12,0
	MSPA (g)				
BR 506	219,8 b *	210,6 b	179,9 b	131,5 a	28,4 a
WILLEY	188,9 b	185,6 b	140,8 b	96,8 a	22,0 a
SF-11	290,4 a	352,0 a	298,4 a	149,2 a	60,0 a
SF-15	321,0 a	333,8 a	296,0 a	171,0 a	51,4 a
TF-17	285,7 a	304,1 a	311,4 a	160,7 a	49,5 a
467-4-2	348,6 a	356,9 a	337,3 a	203,0 a	-
	CA (g)				
BR 506	479,9 a	414,9 a	251,3 a	238,6 a	87,3 a
WILLEY	458,9 a	362,7 a	252,3 b	150,1b	33,9 a
SF-11	286,0 b	220,3 b	219,2 b	131,1 b	66,6 a
SF-15	265,8 b	241,3 b	200,0 b	138,2 b	67,4 a
TF-17	291,3 b	278,1 b	229,3 b	205,4 a	54,3 a
467-4-2	238,0 b	254,2 b	241,8 b	149,5 b	-

*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre as cultivares pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$)

Independente do nível de salinidade, houve diferença entre a área foliar específica (AFE), número de perfilhos (NPf) e matéria seca das folhas (MSF) das cultivares avaliadas (Tabela 3). A AFE foi superior nas cultivares BR 506 e Willey em relação às demais. Por outro lado, a BR 506 apresentou perfilhamento nulo e a Willey teve baixo número de perfilhos, quando comparada às cultivares SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2. A Willey também apresentou os menores valores de MSF.

Tabela 3 - Área foliar específica (AFE), número de perfilhos (NPf) e matéria seca das folhas (MSF) em cultivares de sorgo sacarino independente do nível de salinidade

Cultivares	AFE	NPf	MSF
	($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$)	--	(g)
BR 506	123,5 a *	0 d	25,5 a
Willey	110,2 a	2 c	16,0 c
SF-11	57,3 b	4 a	25,6 a
SF-15	83,5 b	4 a	23,9 a
TF-17	76,0 b	4 a	20,9 b
467-4-2	69,0 b	3 b	19,6 b

*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre as cultivares pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$)

O efeito da salinidade sobre a AFE e a MSF foi similar entre as cultivares. Na AFE, houve acréscimos até o valor máximo de $107,5 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, estimado para a CE_a de $6,13 \text{ dS m}^{-1}$. Acima desta CE_a , os valores de AFE decresceram. A redução na MSF somente foi observada para CE_a acima de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 5).

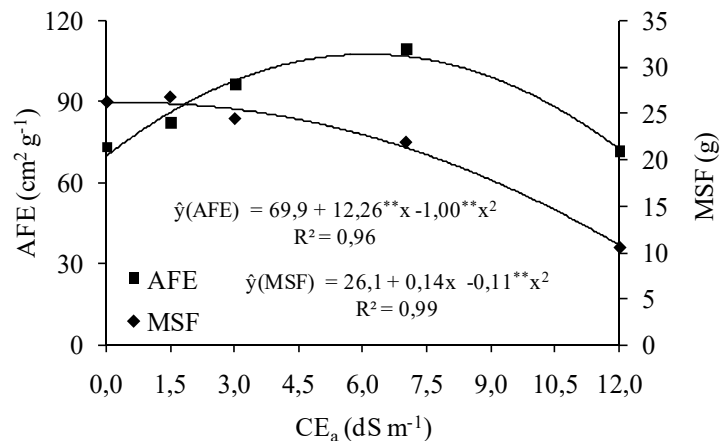


Figura 5 - Área foliar específica (AFE) e matéria seca das folhas (MSF) em plantas de sorgo sacarino, independente da cultivar, submetidas à irrigação com águas de diferentes níveis de salinidade ($0; 1,5; 3,0; 7,0$ e 12 dS m^{-1}). Coeficientes da regressão significativos, com $p < 0,01$ (**)

3.4 Discussão

Os materiais genéticos estudados apresentaram respostas diferenciadas quanto ao crescimento das plantas, estando relacionado tanto às características intrínsecas de cada cultivar, bem como ao efeito dos níveis de salinidade sobre cada estágio fenológico das plantas.

A aplicação de água com CE_a de $12,0 \text{ dS m}^{-1}$ comprometeu o desenvolvimento das cultivares já na fase EC1, importantíssima no estabelecimento das plantas para enfrentamento de condições adversas (TABOSA, 2011), o que pode ter contribuído para ocorrência de estresse salino em nível considerado severo.

O estresse salino severo é caracterizado por causar danos ao metabolismo das plantas. Esses danos estão associados à queda progressiva da atividade de enzimas, inclusive a peroxidase do ascorbato e a catalase, importantes no sistema antioxidativo (WILLADINO et al., 2011). Isto ocasiona danos irreversíveis às estruturas das membranas e componentes celulares (OZDEN; DEMIREL; KAHRAMAN, 2009; REDDY et al., 2015) e decréscimo

significativo da eficiência de carboxilação, com redução na assimilação líquida de CO₂ (SOUZA et al., 2011). Como consequência, verificam-se reduções drásticas no crescimento.

Respostas promissoras quanto à adaptação ao estresse salino também foram observadas nas plantas das diferentes cultivares quando submetidas até a CE_a de 7,0 dS m⁻¹. Analisando a variável AFE, foi possível observar o ponto em que o nível de salinidade começa a comprometer significativamente as funções metabólicas das plantas, ocorrendo a partir da CE_a 6,13 dS m⁻¹, independente da cultivar.

Considerando que a matéria seca das folhas decresceu com o aumento da salinidade, acréscimos na AFE até a CE_a 6,13 dS m⁻¹ representam o efeito da acumulação de íons contribuindo no ajustamento osmótico e manutenção da sua área foliar, semelhante ao que ocorreu com a variedade LM 30074 de *Phaseolus vulgaris* (ARAÚJO et al., 2010).

A partir da CE_a de 6,13 dS m⁻¹, pode-se afirmar que houve efeitos danosos, que podem ser associados à incapacidade da planta em tolerar íons acumulados em concentrações tóxicas (ROY; NEGRÃO; TESTER, 2014), o que ocasionou as perdas significativas de área foliar.

A TF-17 apresentou maior altura que a BR 506 quando não submetida ao estresse salino, porém, foi a cultivar que obteve maiores perdas percentuais com o aumento da salinidade. Como a inibição do alongamento da parte aérea vem sendo associada à restrição hídrica, ocorrendo logo nos primeiros dias de exposição ao estresse salino (MUNNS; TESTER, 2008), a cultivar TF-17 pareceu ser bastante afetada devido ao efeito osmótico causado pelo acúmulo de sais no solo.

Apesar de ser esperado que uma planta com período mais longo da fase vegetativa possua maior altura devido ao aumento do número de nós e comprimento dos entrenós (SHUKLA et al., 2017), este comportamento não foi observado neste trabalho.

O diâmetro do colmo, por sua vez, não necessariamente acompanhou o crescimento em altura das plantas conforme afirmado por Nagai (2012). Demonstra, ainda, ser uma variável pouco precisa para comparação de cultivares de sorgo quanto à tolerância à salinidade.

Durante avaliação da matéria fresca da parte aérea, foi observada redução de 50% nas seis cultivares trabalhadas quando submetidas à CE_a entre 6,5 e 9,4 dS m⁻¹, sendo Willey a cultivar mais sensível e 467-4-2 a menos afetada. No entanto, quando se considera a produção absoluta de matéria fresca, houve destaque para as cultivares BR 506, TF-17 e 467-4-2 quando submetidas à CE_a entre 1,5 e 7,0 dS m⁻¹.

Quanto à matéria seca da parte aérea, BR 506 e Willey apresentaram resultados inferiores às demais, o que pode ter relação com a característica precoce destas cultivares.

Com o ciclo mais curto, existe menor tempo de exposição à fotossíntese, podendo contribuir para menor acumulação de fotossintatos, caso não seja desenvolvido algum mecanismo de compensação energética. Este comportamento também foi observado em trabalho de Nagai (2012), em que as cultivares precoces (BR 506 e IPA 2502) tiveram produtividade de biomassa seca inferiores às cultivares tardias (467-4-2, SF-11 e SF-15).

Muito embora exista semelhança no período de ciclo das cultivares BR 506 e Willey, as similaridades não se estendem à maioria das variáveis analisadas. Observou-se, ainda, a superioridade da BR 506 sobre a Willey quanto à adaptação ao estresse salino. Este fato demonstra que o menor tempo de exposição ao estresse salino não é fator determinante para adaptar-se melhor a essas condições.

O estresse salino em nível considerado moderado favoreceu o incremento de SST nas cultivares BR 506, SF-11 e 467-4-2, atingindo valores máximos de 18,8, 18,4 e 19,8 °Brix para CE_a de 4,2; 3,9 e 4,0 $dS\ m^{-1}$, respectivamente.

Estima-se que o valor mínimo de sólidos solúveis totais (SST) deve ser de 14,25 °Brix para o cultivo ser considerado viável economicamente (MAY et al., 2012). Nesse caso, as cultivares BR 506, SF-11 e 467-4-2 apresentaram potencial para produção de etanol quando cultivado sob CE_a de até 8,76; 9,09 e 8,17 $dS\ m^{-1}$, respectivamente.

O aumento no teor de SST para essas três cultivares, provavelmente, está associado ao efeito de concentração de açúcares com a redução de volume de caldo. Este fato foi constatado com a redução do conteúdo de água nos colmos à medida que se elevou a salinidade.

Observou-se que houve desenvolvimento de mecanismos específicos de forma a minimizar os danos decorrentes do estresse salino sobre processos envolvidos na produção e acumulação e açúcares. Vasilakoglou et al. (2011) não observaram diferenças nos teores de SST entre variedades de sorgo sacarino cultivadas em solos salinos com CE de até 6,9 $dS\ m^{-1}$, o que demonstra ser uma característica que se estende a diversas cultivares dessa espécie.

O aumento da concentração de açúcar nos colmos ainda pode contribuir no ajustamento osmótico das plantas e desempenhar função de proteção de estruturas celulares contra o efeito tóxico de íons acumulados em excesso nessas condições como o Na^+ e Cl^- (PARVAIZ; SATYAWATI, 2008).

Os resultados de SST combinados com os valores de maior conteúdo de água nos colmos demonstram que a BR 506 pode apresentar maior potencial para produção de etanol quando cultivado com CE_a até 7,0 $dS\ m^{-1}$.

No geral, as cultivares avaliadas conseguiram suportar valores de CE_a próximos a 7,0 $dS\ m^{-1}$, demonstrando maiores danos ao crescimento em salinidade superior a este valor. No entanto, deve-se destacar que as plantas de sorgo estudadas se desenvolveram sob uma salinidade superior ao da água de irrigação, pois ocorre aumento na concentração de sais na solução do solo em decorrência da evapotranspiração durante o ciclo da cultura. Diante disso, demonstra-se que o sorgo sacarino é promissor para uso em áreas com CE superior a 4,0 $dS\ m^{-1}$, limite que classifica os solos como salinos (USSLS, 1954).

Contudo, pode-se afirmar que é possível realizar agricultura voltada para alimentação ou produção de biomassa energética em áreas salinizadas, desde que seja adotado um manejo eficiente do sistema solo-água-plantas, tomando os cuidados necessários para minimizar o acúmulo de sais no solo.

3.5 Conclusões

As cultivares BR 506, TF-17 e 467-4-2 apresentam maior potencial de crescimento sob salinidade, sendo que BR 506 é a mais adequada para produção de etanol.

Referências

ALMODARES, A.; HADI, M. R.; ARMADPOUR, H. Sorghum stem yield and soluble carbohydrates under different salinity levels. **African Journal of Biotechnology**, Ebène, v. 7, n. 22, p. 4051-4055, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.5897/AJB08.156>>.

ALVAREZ V., V. H. **Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofres em dois Latossolos de Minas Gerais**. 1974. 125 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1974.

AQUINO, A. J. S.; LACERDA, C. F.; GOMES-FILHO, E. Crescimento, partição de matéria seca e retenção de Na^+ , K^+ e Cl^- em dois genótipos de sorgo irrigados com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 961-971, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000500013>>.

ARAÚJO, C. A. S.; RUIZ, H. A.; CAMBRAIA, J.; NEVES, J. C. L.; FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J. Seleção varietal de *Phaseolus vulgaris* quanto à tolerância ao estresse salino com base em variáveis de crescimento. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 1, p. 132-139, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2010000100021>>.

COELHO, D. S. **Influência da salinidade nos aspectos nutricionais e morfofisiológicos de genótipos de sorgo forrageiro**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, BA, 2013.

DALLA MARTA, A.; MANCINI, M.; ORLANDO, F.; NATALI, F.; CAPECCHI, L.; ORLANDINI, S. Sweet sorghum for bioethanol production: crop responses to different water stress levels. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 64, p. 211-219, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.033>>.

DURÃES, F. O. M. Sorgo sacarino: Desenvolvimento de tecnologia agrônômica. In: EMBRAPA AGROENERGIA. **Sorgo sacarino: tecnologia agrônômica e industrial para a produção de alimentos e energia**. Agroenergia em Revista, ano II, n.3, p. 7, 2011.

FERNANDES, P. D.; BRITO, M. E. B.; GHEYI, H. R.; SOARES-FILHO, W. S.; MELO, A. S.; CARNEIRO, P. T. Crescimento de híbridos e variedades porta-enxerto de citros sob salinidade. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 259-267, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.5582>>.

FERREIRA, D. F. **Programa de análises estatísticas (statistical analysis software) e planejamento de experimentos – SISVAR 5.6** (Build 86). Lavras: DEX/UFLA, 2011.

IGARTUA, E.; GRACIA, M. P.; LASA, J. M. Characterization and genetic control of germination, emergence responses of grain sorghum to salinity. **Euphytica**, Amsterdam, v. 76, n. 3, p.185-193, 1995. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF00022163>>.

KRISHNAMURTHY, L.; SERRAJ, R.; HASH, C. T.; DAKHEEL, A. J.; REDDY, B. V. S. Screening sorghum genotypes for salinity tolerant biomass production. **Euphytica**, Amsterdam, v.156, n. 1, p.15–24, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10681-006-9343-9>>.

MAY, A.; DURÃES, F. O. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. C. (Ed.). **Sistema Embrapa de produção agroindustrial de sorgosacarino para bioetanol: Sistema BRS1G - Tecnologia Qualidade Embrapa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. p. 92-106.

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

NAGAI, M. A. **Produtividade de biomassa de sorgo sacarino sem irrigação na zona da mata norte de Pernambuco**. 55 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

PARVAIZ, A.; SATYAWATI, S. Salt stress and phyto-biochemical responses of plants – a review. **Plant, Soil and Environment**, Slezská, v. 54, n. 3, p. 89-99, 2008.

OZDEN, M.; DEMIREL, U.; KAHRAMAN, A. Effects of proline on antioxidant system in leaves of grapevine (*Vitis vinifera* L.) exposed to oxidative stress by H₂O₂. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 119, n. 2, p. 163-168, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.07.031>>.

REDDY, P. S.; JOGESWAR, G.; RASINENI, G. K.; MAHESWARI, M.; REDDY, A. R.; VARSHNEY, R. K.; KISHOR, P. B. K. Proline over-accumulation alleviates salt stress and

protects photosynthetic and antioxidant enzyme activities in transgenic sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 94, p.104-103, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.05.014>>.

REDDY, S. J.; AMORIM NETO, M. S. **Dados de precipitação, evapotranspiração potencial, radiação solar global de alguns locais e classificação climática do Nordeste do Brasil**. Petrolina: EMBRAPA/CPATSA, 280 p, 1983.

REIS, A. L. S.; DAMILANO, E. D.; MENEZES, R. S. C.; MORAIS JR, M. A. Second-generation ethanol from sugarcane and sweet sorghum bagasses using the yeast *Dekkera bruxellensis*. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.92, n.15, p.255-292, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2010000100021>>.

RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A.M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Tradução de H. R. GHERI, J. R. de SOUZA, J. E. QUEIROZ. Campina Grande: UFPB, 2000. p. 27. FAO. Estudos Irrigação e Drenagem, 48.

ROY, S. J.; NEGRÃO, S.; TESTER, M. Salt resistant crop plants. **Current Opinion in Biotechnology**, Amsterdam, v. 26, p. 115-124, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.12.004>>.

SHUKLA, S.; FELDERHOFF, T. J.; SABALLOS, A.; VERMERRIS, W. The relationship between plant height and sugar accumulation in the stems of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 203, p. 181-191, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.004>>.

SOUZA, R. P.; MACHADO, E. C.; SILVEIRA, J. A. G.; RIBEIRO, R. V. Fotossíntese e acúmulo de solutos em feijoeiro caupi submetido à salinidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 6, p. 586-592, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011000600003>>.

TABOSA, J. N. **Fenologia da planta de sorgo**. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco-IPA, 2011. 16p.

TAVAKKOLI, E.; RENGASAMY, P.; MCDONALD, G. K. High concentrations of Na⁺ and Cl⁻ ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, n. 15, p. 4449-4459, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erq251>>.

UNITED STATES SALINITY LABORATORY STAFF - USSLS. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Department of Agriculture, 1954. p. 82-134. (Agriculture Handbook No. 60)

VASILAKOGLU, I.; DHIMA, K.; KARAGIANNIDIS, N.; GATSIS, T. Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 38-46, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.08.011>>.

VIEIRA, M. R.; LACERDA, C. F.; CÂNDIDO, M. J. D.; CARVALHO, P. L.; COSTA, R. N. T.; TABOSA, J. N. Produtividade e qualidade da forragem de sorgo irrigado com águas

salinas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, suppl, p. 42-46, 2005.

WILLADINO, L.; OLIVEIRA FILHO, R.A.; SILVA JÚNIOR, E. A.; GOUVEIA NETO, A.; CÂMARA, T. R. Salinity stress in two varieties of sugar cane:enzymes of the antioxidant system and chlorophyll fluorescence. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 417-422, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902011000200022>>.

**4 TROCAS GASOSAS E AJUSTAMENTO OSMÓTICO EM CULTIVARES DE
SORGO SACARINO SOB ESTRESSE SALINO**

Trocas gasosas e ajustamento osmótico em cultivares de sorgo sacarino sob estresse salino

Resumo

O sorgo sacarino é conhecido por sua boa adaptabilidade à salinidade, no entanto, os mecanismos desenvolvidos por essas plantas sob estresse salino ainda foram pouco elucidados. O objetivo deste estudo foi avaliar as trocas gasosas e os teores foliares de Na^+ , Cl^- e solutos orgânicos em cultivares de sorgo sacarino sob estresse salino. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 6×5 , com seis cultivares (BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2), águas de irrigação com cinco valores de condutividade elétrica (0,0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12,0 dS m^{-1}), em três repetições. Foram realizadas medidas de taxa de fotossíntese, condutância estomática, transpiração e eficiência intrínseca do uso da água, com leitura quinze dias após o início das aplicações das soluções salinas e outra próxima à colheita. Também foram determinados os teores foliares de Na^+ , Cl^- , açúcares solúveis totais, açúcares redutores, aminoácidos livres e proteínas solúveis. O aumento da salinidade causou redução significativa da atividade fotossintética das cultivares de sorgo sacarino, no entanto, a cultivar BR 506 demonstra ser a mais eficiente. O fechamento estomático, o aumento da eficiência intrínseca do uso da água e o ajustamento osmótico representam alguns mecanismos de adaptação às condições de estresse salino nas cultivares de sorgo sacarino trabalhadas, sendo os açúcares solúveis, principalmente os não redutores, os mais importantes no processo de osmorregulação.

Palavras-chave: Salinidade. *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Fotossíntese. Solutos Orgânicos. Cloreto. Sódio.

Gas exchange and osmotic adjustment in sweet sorghum cultivars under salt stress

Abstract

Sweet sorghum is known for its good adaptability to salinity, however, the mechanisms developed by these plants submitted to these stress conditions have not been fully elucidated. The aim of this study was to evaluate the gas exchange and leaf contents of Na⁺, Cl⁻ and organic solutes in sweet sorghum cultivars under salt stress. The experimental design was a randomized complete block design with six cultivars (BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 and 467-4-2), solutions with five values of electrical conductivity (0.0, 1.5, 3.0, 7.0 and 12.0 dS m⁻¹), in three replicates. Measurements of photosynthesis rate, stomatal conductance, transpiration and intrinsic water use efficiency were carried out, with reading seven days after the application of saline solutions and another near the harvest. Leaf contents of Na⁺, Cl⁻, total soluble sugars, reducing sugars, free amino acids and soluble proteins were also determined. The increase in salinity caused a reduction in the photosynthetic activity of sweet sorghum cultivars, however, a cultivar BR 506 proves to be more efficient. The stomatal closure, the increase in the intrinsic water use efficiency and the osmotic adjustment represent some mechanisms of adaptation to the saline stress conditions in cultivated sweet sorghum cultivars, and the soluble sugars, mainly are not reducing, more recent in the process of osmoregulation .

Keywords: Salinity. *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Photosynthesis. Organic solutes. Chlorine. Sodium.

4.1 Introdução

A salinização dos solos vem se agravando cada vez mais em áreas agrícolas de regiões áridas e semiáridas, comprometendo a produtividade de diversas culturas não adaptadas a essas condições. Para contornar esse problema, é essencial que sejam estabelecidas culturas com importância socioeconômica capazes de tolerar o estresse salino presente nessas áreas.

Neste cenário, o sorgo sacarino tem se destacado devido à sua adaptabilidade às condições de estresse hídrico e salino, e por produzir mais etanol por unidade de área do que muitas outras culturas, especialmente sob a utilização mínima de insumos (REGASSA; WORTMANN, 2014). Contudo, é importante conhecer os mecanismos relacionados a sua tolerância ao estresse salino, para contribuir com programas de melhoramento genético e estabelecimento de novos genótipos.

Sob salinidade, as plantas podem sofrer danos com o estresse osmótico e com a toxicidade de íons específicos como o Na^+ e Cl^- (HASEGAWA, 2013, GEILFUS et al., 2015). Em primeiro momento, a salinização do solo causa a redução do seu potencial osmótico, provocando limitação na capacidade das plantas em absorver água (MUNNS; TESTER, 2008). Como consequência, observa-se a redução no crescimento e na condutância estomática, afetando, por sua vez, a fotossíntese (GHARBI et al, 2017). Os sintomas de acumulação dos íons Na^+ e Cl^- nos tecidos das plantas são agravados com o tempo de exposição à salinidade, sendo mais severos quando ocorre sua concentração no citosol de células foliares (FLOWERS; MUNNS; COLMER, 2015).

A toxicidade desses íons está associada à capacidade de causar danos ao aparato fotossintético, reduzir o rendimento quântico devido à degradação da clorofila, causar impactos estruturais ao fotossistema e perturbar a regulação estomática (TAVAKKOLI; RENGASAMY; McDONALD, 2010), entre outros. A redução da eficiência fotossintética ainda pode provocar acúmulo de espécies reativas de oxigênio, acarretando danos oxidativos (REDDY et al., 2015).

Para adaptação das plantas a estas condições de estresse, é necessária a ativação de diversos mecanismos específicos capazes de minimizar os efeitos negativos proporcionados pelo estresse salino.

O ajustamento osmótico é o mecanismo desenvolvido pelas plantas que permite a diminuição do seu potencial osmótico através do acúmulo de íons e solutos orgânicos fazendo com que se mantenha um gradiente de potencial de água favorável para absorver água e manter uma pressão de turgor (MUNNS et al., 2016).

Em contrapartida, a toxicidade de íons como o Na^+ e Cl^- pode ser minimizada após as plantas desenvolverem mecanismos bioquímicos que incluem compartimentação de íons nos vacúolos, biossíntese de osmoprotetores, regulação de transporte (SHABALA; HARIADI; JACOBSEN, 2013) e/ou exclusão desses íons (KCHAOU et al., 2010).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar as trocas gasosas e os teores foliares de Na^+ , Cl^- e solutos orgânicos em cultivares de sorgo sacarino sob estresse salino.

4.2 Material e Métodos

O experimento foi implantado em casa de vegetação na área experimental da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), em Juazeiro, Bahia, Brasil ($09^{\circ}24'41''\text{S}/40^{\circ}30'57''\text{W}$, 368 m). O delineamento experimental foi em blocos casualizados, dispostos em esquema fatorial 6×5 , com seis cultivares de sorgo sacarino, cinco níveis de salinidade e três repetições.

As cultivares selecionadas foram: BR 506 e Willey (precoce), SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2 (tardias). Os níveis de salinidade foram representados por cinco valores de condutividade elétrica da água de irrigação (CE_a): 0,0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12,0 dS m^{-1} .

O cultivo foi realizado em vasos de 20 litros preenchidos com uma camada de 2 cm de brita e, em seguida, 15 kg de amostra superficial de um ARGISSOLO AMARELO Distrófico latossólico, de textura média, coletado na camada de 0,0 a 0,2 m (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição química e granulométrica do solo utilizado para o cultivo de sorgo sacarino sob diferentes níveis de salinidade

C.O. g kg^{-1}	pH (1:2,5)	CE_{es} dS m^{-1}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Al^{3+}	S	H+Al	T
1,9	5,7	0,23	1,0	0,7	0,07	0,33	0,0	2,1	1,6	3,7
V	P	Cu	Fe	Mn	Zn	B	areia	silte	argila	
%	mg dm^{-3}		mg dm^{-3}				g kg^{-1}			
57	17	0,5	67,9	32,7	6,1	0,19	847	135		18

C.O. - carbono orgânico (método Walkley-Black); CE_{es} - condutividade elétrica do extrato de saturação; Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} (extração em $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$); H+Al [extração em $\text{Ca } (\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$, 1 mol L^{-1} , pH 7,0]; Na^+ , K^+ , P, Cu, Fe, Mn e Zn (extração por Mehlich-1); B (extração em água quente); S - soma de bases; T - capacidade de troca de cátions [$\text{S}+(\text{H}+\text{Al})$]; V - saturação por bases

Duas semanas após a semeadura realizou-se o desbaste deixando apenas uma plântula por vaso e iniciou-se a irrigação com as soluções salinas. As soluções foram preparadas a partir dos sais NaCl , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, de modo a se obter proporção equivalente

entre Na:Ca:Mg de 7:2:1 (AQUINO; LACERDA; GOMES-FILHO, 2007). O intervalo de irrigação foi de 48 horas, efetuando-se a reposição do volume de água perdido, mais 15% referente à fração de lixiviação.

Para manejo da irrigação, foram instalados lisímetros de pesagem em todos os vasos de um mesmo bloco. Os lisímetros foram equipados com células de carga (modelo TSD, AEPH, capacidade de 50 kg) instaladas sob uma plataforma metálica com dispositivo de coleta do excesso de água drenado. As células de carga foram conectadas a dois multiplexadores (AM16/32B, Campbell Scientific) ligados a um datalogger (CR1000, Campbell Scientific), o qual registrou leituras a cada 15 minutos. A calibração do equipamento foi realizada a partir de leituras de sinal (mV) após aplicações sucessivas de água até atingir a capacidade de campo.

A correção da fertilidade do solo foi feita através de aplicações de 500 mL de solução nutritiva, contendo 160, 400, 210, 150, 50 e 180 mg L⁻¹ de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, e 0,81; 1,33; 0,15; 3,66; 4,0; 0,1 mg L⁻¹ dos respectivos micronutrientes B, Cu, Mo, Mn, Zn e Fe (ALVAREZ V., 1974). As fontes utilizadas foram (NH₄)₂SO₄, KH₂PO₄, Na₂HPO₄.H₂O, Ca(NO₃)₂, MgSO₄, CaCl₂.2H₂O, H₃BO₃, CuSO₄.5H₂O, (NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O, MnSO₄.H₂O, ZnSO₄.H₂O, FeSO₄.7H₂O e NaEDTA. A aplicação de nutrientes foi iniciada após o desbaste e realizada em três parcelas com intervalos de vinte dias.

As leituras de trocas gasosas foram realizadas após quinze dias de estresse salino (1) e antes da colheita das plantas (2), utilizando o Analisador Portátil de Gás Infravermelho (IRGA), modelo Li-6400. As variáveis analisadas foram: taxa de fotossíntese (P_n), condutância estomática (g_s), transpiração (T_p) e eficiência intrínseca do uso da água (EIUA).

Durante a colheita foram coletadas e congeladas em nitrogênio líquido as folhas +3 das plantas para determinação dos teores de açúcares solúveis totais (AST), açúcares redutores (AR), aminoácidos livres (AA) e proteínas solúveis (Pt).

Para extração de solutos orgânicos, folhas frescas foram maceradas com adição de solução tampão fosfato (1,0 mol L⁻¹) ajustado para pH 7,0. Em seguida, os materiais foram centrifugados a 2.000xg, coletando-se o sobrenadante para as posteriores análises.

Os AST foram determinados de acordo com o método da Antrona (YEMM; WILLIS, 1954) e os AR quantificados a partir da utilização do ácido 3,5 dinitrossalicílico (MILLER, 1959). As curvas padrão foram obtidas com soluções de glicose, sendo posteriormente realizadas leituras em espectrofotômetro UV nos comprimentos de onda de 620 e 540 nm para AST e AR, respectivamente.

Os AA foram determinados através do ensaio da ninhidrina (YEMM; COCKING, 1955), utilizando glicina como padrão. As Pt foram quantificadas a partir do método de Bradford (1976), utilizando solução padrão de Albumina Sérica Bovina (BSA). As curvas foram ajustadas a partir de leituras espectrofotométricas nos comprimentos de onda de 570 e 595 nm para AA e Pt, respectivamente.

O teor de Na^+ foi determinado em folhas utilizando método de digestão nítrico-perclórica (1:3 v/v) e posterior leitura em fotômetro de chama. A determinação do teor de Cl^- foi realizada após extração em água e titulação com AgNO_3 utilizando $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ como indicador.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância. Para os casos em que o fator CE_a foi significativo foram selecionados modelos de regressão testados a 5% e 1% de probabilidade que apresentaram maior coeficiente de determinação (R^2). Para comparação entre as cultivares foi realizado o teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

4.3 Resultados

A interação entre as cultivares e a condutividade elétrica da água de irrigação (CE_a) foi significativa apenas para a transpiração das plantas na 2ª leitura (T_{p2}) e para teores foliares de Na^+ e Cl^- . As demais variáveis foram diferentes entre os níveis de salinidade, independente da cultivar avaliada.

Também foram observadas diferenças entre cultivares, independente do nível de salinidade, exceto para teores de açúcares solúveis totais (AST) e redutores (AR) e as variáveis de trocas gasosas da primeira leitura: taxa de fotossíntese (P_{n1}), condutância estomática (g_{s1}) e transpiração (T_{p1}).

As taxas de fotossíntese (P_n) e condutância estomática (g_s) decresceram linearmente com o aumento do nível de salinidade para as duas leituras realizadas, no entanto, a redução da taxa de fotossíntese ocorreu de forma mais acentuada na segunda leitura. Os valores de condutância estomática na primeira leitura (g_{s1}) foram superiores à segunda (g_{s2}), porém, as taxas de redução dessa variável com o aumento da salinidade foram praticamente proporcionais entre as duas leituras (Figuras 1A e 1B).

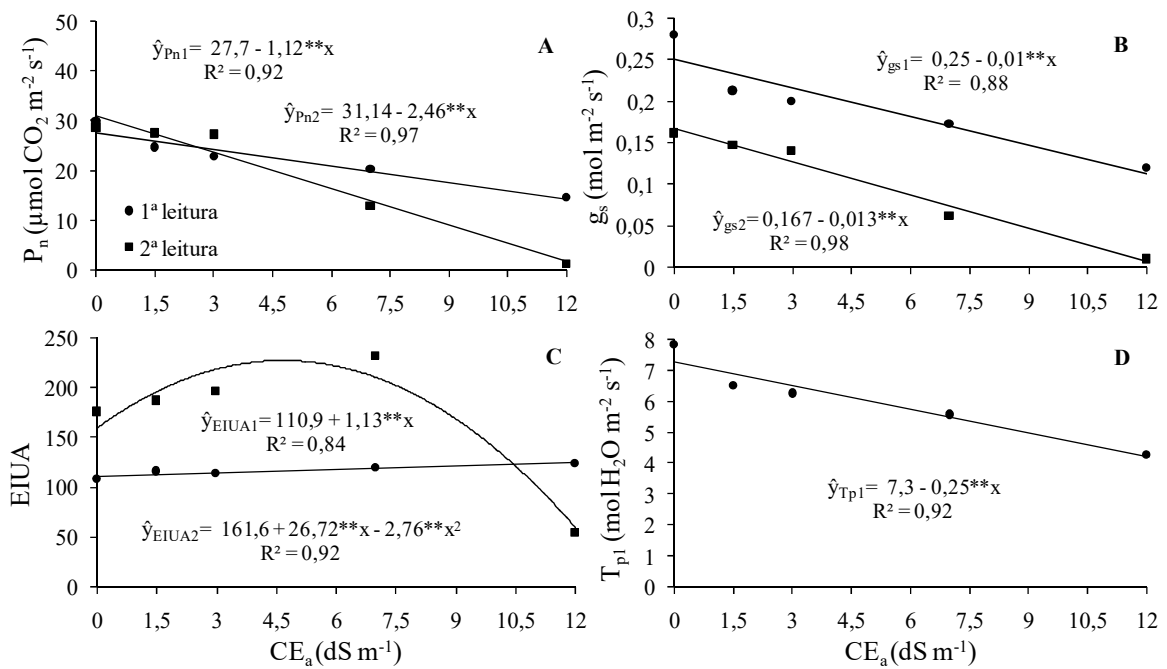


Figura 1 - Taxa de fotossíntese - P_n (A), condutância estomática - g_s (B), eficiência intrínseca do uso da água - EIUA (C) e transpiração - T_p (D) em plantas de sorgo sacarino sete dias após o início da irrigação com águas salinas (1) e próximo à colheita (2). Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**)

A eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) apresentou sensível incremento com o aumento da salinidade na primeira leitura, enquanto que na segunda, acréscimos na EIUA ocorreram de forma considerável até a CE_a estimada em $9,68 \text{ dS m}^{-1}$. Após este valor, a EIUA decresce significativamente (Figura 1C).

Na primeira leitura, a taxa de transpiração reduz com o aumento da salinidade de forma que não houve diferenças entre as cultivares (Figura 1D). Na segunda leitura, onde a interação entre cultivares e níveis de salinidade foi significativa para taxa de transpiração, as cultivares BR 506 e Willey se destacam, obtendo as maiores taxas para os primeiros níveis de salinidade (Figura 2). No entanto, as taxas de transpiração não se diferenciam entre cultivares para a CE_a de 12 dS m^{-1} .

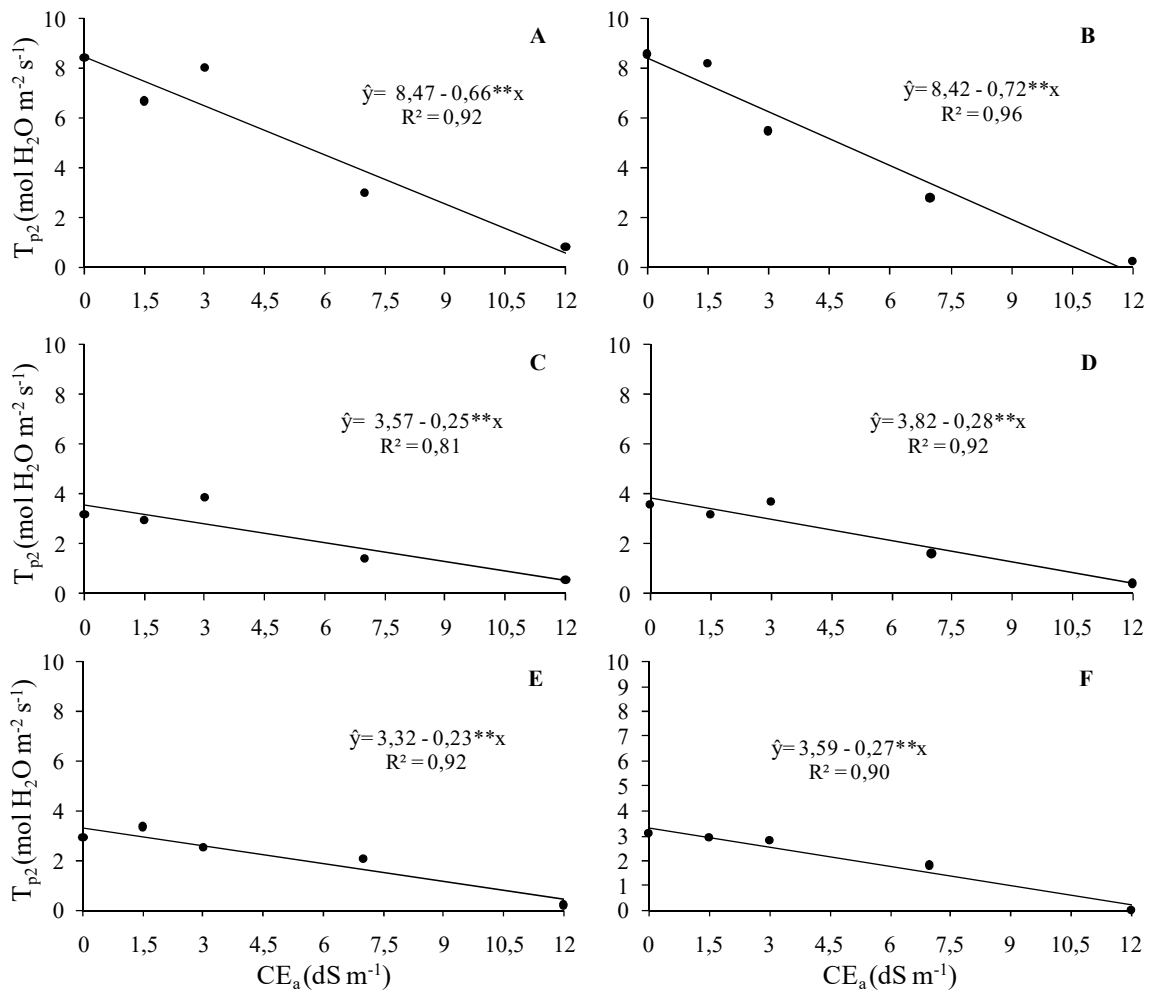


Figura 2 - Transpiração medida próximo à colheita (E_2) das respectivas cultivares de sorgo sacarino BR 506 (A), Willey (B), SF-11 (C), SF-15 (D), TF-17 (E), 467-4-2 (F), irrigadas com águas de salinidade crescente (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 $dS m^{-1}$). Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**)

Independente do nível de salinidade observou-se que as cultivares BR 506 e Willey se destacaram na segunda leitura de trocas gasosas para as variáveis taxa de fotossíntese (P_n), condutância estomática (g_s) e eficiência intrínseca do uso da água (EIUA). A EIUA da primeira leitura na BR 506 também foi superior às demais cultivares, enquanto que a Willey se destacou, juntamente com a SF-15, em relação ao teor de proteínas solúveis (Tabela 2).

Tabela 2 - Variáveis avaliadas em cultivares de sorgo sacarino independente do nível de salinidade da água de irrigação

Cultivar	EIUA ₁ ^{1/} ($\mu\text{mol CO}_2$ $\text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)	P _{n2} ^{2/} ($\mu\text{mol CO}_2$ $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	g _{s2} ^{3/} ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	EIUA ₂ ^{4/} ($\mu\text{mol CO}_2$ $\text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)	Pt ^{5/} (mg g^{-1})	AA ^{6/} (mg g^{-1})
BR 506	13,7 a	26,5a	0,133 a	227,4 a	15,4b	3,24 a
Wiley	7,7 b	26,2 a	0,127a	233,2a	25,6 a	3,48 a
SF-11	6,1 b	16,0b	0,096 b	150,7b	19,9b	1,32 b
SF-15	10,2 b	17,7b	0,100 b	161,0 b	25,5 a	2,67 a
TF-17	11,2 b	14,7b	0,086b	119,9b	15,3 b	3,35 a
467-4-2	9,0 b	16,4 b	0,085b	155,4 b	17,7b	4,22 a

^{1/}eficiência intrínseca do uso da água - 1ª leitura; ^{2/}taxa de fotossíntese - 2ª leitura; ^{3/}condutância estomática - 2ª leitura; ^{4/}eficiência intrínseca do uso da água - 2ª leitura; ^{5/}proteína total; ^{6/}aminoácidos livres. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade

Independente da cultivar avaliada, maiores níveis de salinidade também contribuíram para o aumento linear dos teores de açúcares solúveis totais (AST) e de açúcares redutores (AR) nas folhas de sorgo sacarino, enquanto que houve redução nos teores de proteínas solúveis (Pt). Para os teores de aminoácidos (AA), houve decréscimo até a CE_a estimada em 4,7 dS m⁻¹. Acima desta CE_a, houve tendência de aumento de AA (Figura 3).

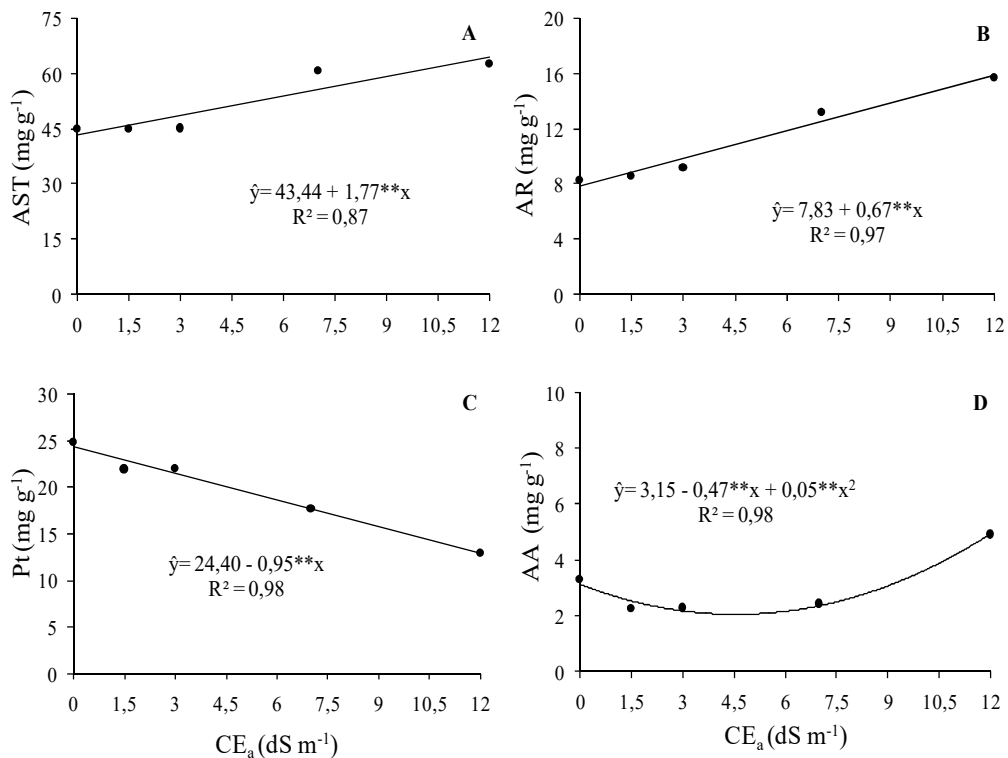
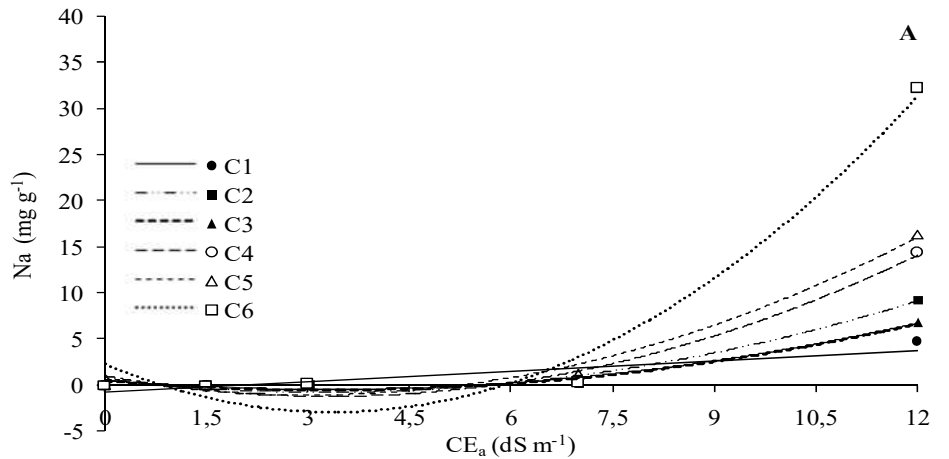


Figura 3 - Açúcares solúveis totais – AST (A), açúcares redutores - AR (B), proteínas solúveis - Pt (C) e aminoácidos livres - AA (D) em folhas de sorgo sacarino irrigado com águas de salinidade crescente, independente da cultivar. Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**)

Os teores de sódio nas folhas de sorgo sacarino não diferiram entre as cultivares até a CE_a de $7,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 4A). A partir desta CE_a , houve acréscimos significativos no teores de sódio das folhas, sendo os maiores valores apresentados pela cultivar 467-4-2, e os menores representados pela cultivar BR 506.



$$\hat{y}_{C1} = -0,75 + 0,37^*x \quad R^2 = 0,73$$

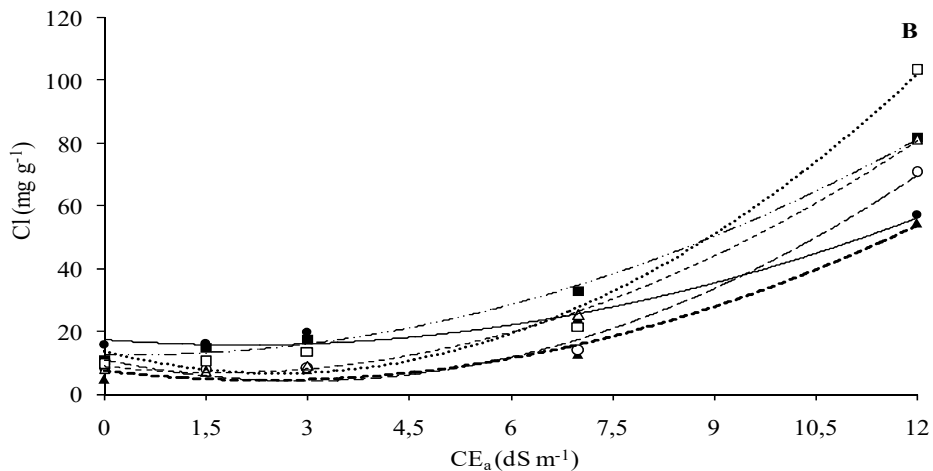
$$\hat{y}_{C4} = 0,95 - 1,33^*x + 0,20^{**}x^2 \quad R^2 = 0,97$$

$$\hat{y}_{C2} = 0,61 - 0,83x + 0,13^{**}x^2 \quad R^2 = 0,98$$

$$\hat{y}_{C5} = 0,88 - 1,27^*x + 0,21^{**}x^2 \quad R^2 = 0,98$$

$$\hat{y}_{C3} = 0,47 - 0,62x + 0,094^*x^2 \quad R^2 = 0,97$$

$$\hat{y}_{C6} = 2,23 - 3,09^{**}x + 0,46^{**}x^2 \quad R^2 = 0,97$$



$$\hat{y}_{C1} = 17,42 - 1,69x + 0,41^{**}x^2 \quad R^2 = 0,98$$

$$\hat{y}_{C4} = 11,05 - 4,61^{**}x + 0,79^{**}x^2 \quad R^2 = 0,99$$

$$\hat{y}_{C2} = 12,68 - 0,41x + 0,51^{**}x^2 \quad R^2 = 0,99$$

$$\hat{y}_{C5} = 8,84 - 2,38x + 0,70^{**}x^2 \quad R^2 = 0,99$$

$$\hat{y}_{C3} = 7,65 - 2,53^*x + 0,53^{**}x^2 \quad R^2 = 0,98$$

$$\hat{y}_{C6} = 13,83 - 5,49^{**}x + 1,07^{**}x^2 \quad R^2 = 0,98$$

Figura 4 - Teores de sódio (A) e cloro (B) em folhagem das cultivares de sorgo sacarino BR 506 (C₁), Willey (C₂), SF-11 (C₃), SF-15 (C₄), TF-17 (C₅), 467-4-2 (C₆), irrigadas com águas de salinidade crescente (0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12 dS m^{-1}). Coeficientes da regressão significativos com $p < 0,01$ (**) ou $p < 0,05$ (*)

Os teores de cloro nas folhas foram superiores aos de sódio em todos os níveis de salinidade. Um aumento evidente dos teores de cloro ocorreu a partir da CE_a de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, atingindo valores consideravelmente altos na CE_a de $12,0 \text{ dS m}^{-1}$. Para esta CE_a , as cultivares que apresentaram os menores teores de cloro foram SF-11 e BR 506, enquanto que o maior valor observado foi na cultivar 467-4-2.

4.4 Discussão

A salinidade afetou diretamente as trocas gasosas das cultivares de sorgo sacarino, com reduções nas taxas de fotossíntese (P_n), na condutância estomática (g_s) e na transpiração (T_p) para as duas leituras realizadas, demonstrando que, em parte, a queda de atividade fotossintética está associada a uma limitação da abertura dos estômatos.

A capacidade de controlar a abertura dos estômatos durante o estresse salino é certamente vantajosa, pois auxilia na economia de água e pode minimizar o acúmulo foliar de Na^+ e Cl^- em níveis tóxicos (GEILFUS et al., 2015).

A dinâmica da abertura dos estômatos tem sido relacionada às alcalinizações apoplásticas transitórias de folhas, as quais modulam as concentrações de ácido abscísico (ABA) ao redor das células-guarda, tendo como consequência, a indução do fechamento dos estômatos (WILKINSON; DAVIES, 2008). Geilfus et al. (2015) constataram que este processo ocorre em resposta ao contato do cloreto com as raízes de plantas em condições de estresse salino.

De acordo com Negin e Moshelion (2016), a transpiração é linearmente correlacionada com a condutância estomática (g_s) e aumenta a uma taxa constante em relação à g_s devido à sua natureza não enzimática.

Neste trabalho, foram verificadas diferenças na g_{s2} entre cultivares de sorgo sacarino, sendo as cultivares BR-506 e Willey superiores às demais, o que refletiu em maiores taxas de fotossíntese e de transpiração.

Por outro lado, quando se compara $EIUA_1$ e $EIUA_2$, é possível afirmar que o maior tempo de exposição ao estresse salino exigiu das plantas a ativação de mecanismos que contribuíram para um aumento da eficiência intrínseca do uso da água.

Tem-se discutido que a eficiência do uso da água tende a ser crescente com a regulação da condutância estomática, reduzindo as perdas de água em condições que ainda permitam a assimilação de CO_2 (NEGIN; MOSHELION, 2016).

O fato de que as plantas de sorgo sacarino apresentam metabolismo C_4 também contribui para o aumento na eficiência do uso da água, mantendo a atividade fotossintética em taxas ainda elevadas mesmo quando há redução temporária na disponibilização de CO_2 devido ao fechamento estomático (TAIZ; ZEIGER, 2013). Dias e Brüggemann (2010) verificaram maior eficiência do uso da água nas espécies do gênero *Flaveria* que apresentaram predominância na carboxilação do CO_2 pela PEPcase, conforme a rota das plantas C_4 .

No entanto, o fechamento estomático pode trazer consequências negativas como o aumento da temperatura da folha e da razão intracelular de $O_2:CO_2$, levando ao estresse oxidativo (LIU et al., 2014). O estresse oxidativo ocorre devido à acumulação de espécies reativas de oxigênio (ROS), as quais são tóxicas para as células vegetais e podem ser combinadas com moléculas vitais, como gorduras, proteínas, ácidos nucleicos, causando peroxidação lipídica, desnaturação protéica e mutação do DNA (BOUTRAA et al., 2011).

Neste trabalho, as taxas de redução de g_{s1} e g_{s2} foram praticamente idênticas, apesar de g_{s2} ser inferior à g_{s1} e o decréscimo de P_{n2} com o aumento da salinidade ser superior ao P_{n1} . Isto pode indicar a existência de uma limitação não estomática, que é agravada com o tempo de exposição ao estresse salino.

É importante ressaltar que as limitações na fotossíntese não podem ser sempre atribuídas ao fechamento estomático, podendo estar associadas, também, à ocorrência de danos ao aparato fotossintético ou às interferências na atividade enzimática diretamente relacionadas com reações fotoquímicas e bioquímicas da fotossíntese (AASAMAA; SÖBER, 2001).

Nesse caso, pode-se considerar a ocorrência de toxicidade de íons como Na^+ e Cl^- ao serem acumulados em excesso nos tecidos das plantas. Tavakkoli, Rengasamy e McDonald (2010) constataram que altos teores de Cl^- reduzem a capacidade fotossintética e o rendimento quântico devido à degradação da clorofila, além de causar impactos estruturais ao fotossistema II. Já o alto teor de Na^+ pode competir pelos sítios de absorção de K^+ e Ca^{2+} e perturbar a regulação estomática, resultando em uma depressão da fotossíntese e crescimento.

Os teores de Na^+ e Cl^- das folhas das cultivares de sorgo sacarino aumentaram consideravelmente com o aumento da CE_a a partir de $7,0 \text{ dS m}^{-1}$, sendo os maiores valores encontrados na cultivar 467-4-2 para CE_a de $12,0 \text{ dS m}^{-1}$, o que provavelmente causou a morte dessas plantas. Em contrapartida, para esta CE_a , as cultivares SF-11 e BR 506 apresentaram os menores teores foliares de Na^+ e Cl^- .

Também foi verificado que os teores de Na^+ nas folhas de sorgo sacarino de todas as cultivares foram inferiores aos teores de Cl^- , o que demonstra a ocorrência de algum mecanismo específico que limita a concentração de Na^+ nas folhas.

Willadino et al. (2011) verificaram que o genótipo de bananeira “preciosa” demonstrou apresentar estratégias de extrusão de Na^+ para a solução do solo e remoção de Na^+ do xilema, resultando na manutenção dos menores teores de Na^+ no tecido. De acordo com Zhu et al. (2010), a tolerância ao estresse por salinidade em trigo está fortemente associada à capacidade da planta de controlar a liberação de Na^+ para a parte aérea, utilizando um transportador seletivo de Na^+ localizado na membrana plasmática das células de raiz.

O ajustamento osmótico foi indicado como um dos mecanismos de tolerância à salinidade desenvolvidos por variedades de *Zea mays* L. (HAJLAOUI et al., 2010). Gharbi et al. (2017) observaram que os íons Na^+ e K^+ são os maiores contribuintes para o ajustamento osmótico em plantas de *Solanum chilense*. Também foi constatado que os íons Na^+ e Cl^- participam efetivamente no ajuste osmótico de *Ricinus communis* L. à salinidade (RODRIGUES et al., 2014).

Do ponto de vista energético, o ajustamento osmótico através do consumo de íons é mais eficiente do que o uso de solutos orgânicos, cuja síntese desviaria elementos como carbono e nitrogênio, que seriam anteriormente utilizados no crescimento das plantas (FLOWERS; MUNNS; COLMER, 2015).

No entanto, os solutos orgânicos desempenham papel importante no metabolismo de plantas sob estresse salino, pois, além de contribuir com o potencial osmótico, exercem função regulatória (GHARBI et al., 2017) e de proteção (HELD; SADOWSKI, 2016).

Quanto à acumulação de solutos orgânicos nas folhas de sorgo sacarino, as respostas foram semelhantes entre as cultivares trabalhadas, havendo incremento de açúcares solúveis totais (AST) e açúcares redutores (AR) com a salinidade. Nesse caso, o aumento dos teores de açúcares foi na ordem de 1,77 mg de AST e 0,67 mg de AR para cada acréscimo de 1 dS m^{-1} da CE_a . Isto demonstra que os açúcares solúveis, principalmente não redutores, desempenharam papel importante na osmorregulação das cultivares em resposta ao estresse salino.

O acúmulo de açúcares solúveis também exerceu função importante no ajustamento osmótico de cultivares de milho (HAJLAOUI et al., 2010), feijão caupi (SOUZA et al., 2011) e arroz (GASHAW et al., 2014).

Tem-se destacado o papel de fitohormônios atuando diretamente sobre o metabolismo do açúcar. Trouverie et al. (2004) verificaram que nas folhas de milho submetidas a um

estresse hídrico moderado, o ABA é um forte indutor da invertase vacuolar, realizando a quebra da sacarose em glicose e frutose para gerar pressão osmótica no vacúolo.

Em contrapartida, os teores de proteínas solúveis (Pt) decresceram na ordem de 0,95 mg Pt para cada incremento de 1,0 dS m⁻¹ da CE_a, demonstrando que houve proteólise devido ao estresse salino. Os aminoácidos livres (AA) também decresceram até a CE_a de 4,7 dS m⁻¹, apresentando posterior aumento até a CE_a de 12,0 dS m⁻¹, o que pode estar relacionado ao acúmulo de produtos da própria proteólise.

Portanto, constatou-se que o sorgo sacarino, independente da cultivar avaliada, desenvolveu mecanismos para se adaptar às condições de estresse salino. Esses mecanismos estão relacionados com o fechamento estomático, o aumento na eficiência do uso da água e o ajustamento osmótico, associado ao aumento nos teores foliares dos íons Na⁺, Cl⁻ e açúcares solúveis, principalmente não redutores.

As cultivares BR 506 e Willey, por serem precoces, apresentaram uma aparente vantagem sobre a disponibilidade hídrica dessas plantas, uma vez que o tempo de exposição e a intensidade do estresse salino foi inferior às demais cultivares avaliadas, principalmente na fase inicial de crescimento destas plantas.

Também é provável que as cultivares SF-11 e BR 506 desenvolvam algum mecanismo que bloqueia, em parte, o acúmulo de Na⁺ em suas folhas, uma vez que apresentaram valores inferiores às outras cultivares, quando submetidas à CE_a de 12,0 dS m⁻¹. Para esta mesma CE_a, a morte da cultivar 467-4-2 pode estar relacionado com os altos teores de Na⁺ e Cl⁻ nas suas folhas.

4.5 Conclusões

O aumento da salinidade causou redução significativa da atividade fotossintética das cultivares de sorgo sacarino, no entanto, a cultivar BR 506 demonstra ser a mais eficiente.

O fechamento estomático, o aumento da eficiência intrínseca do uso da água e o ajustamento osmótico representam alguns mecanismos de adaptação às condições de estresse salino nas cultivares de sorgo sacarino trabalhadas, sendo os açúcares solúveis, principalmente os não redutores, os mais importantes no processo de osmorregulação.

Referências

- AASAMAA, K.; SÖBER, A. Hydraulic conductance and stomatal sensitivity to changes of leaf water status in six deciduous tree species. **Biologia Plantarum**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 65-73, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1017970304768>>.
- ALVAREZ V., V. H. **Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofres em dois latossolos de Minas Gerais**. 125 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1974.
- AQUINO, A. J. S.; LACERDA, C. F.; GOMES-FILHO, E. Crescimento, partição de matéria seca e retenção de Na⁺, K⁺ e Cl⁻ em dois genótipos de sorgo irrigados com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 961-971, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000500013>>.
- BOUTRAA, T.; AKHKHA, A.; AL-SHOAIBI, A. A.; ALHEJELI, A. M. Effect of water stress on growth and water use efficiency (QUE) of some wheat cultivars (*Triticum durum*) grown in Saudi Arabia. **Journal of Taibah University for Science**, Amsterdam, v. 3, p. 39-48, 2010. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1658-3655\(12\)60019-3](https://doi.org/10.1016/S1658-3655(12)60019-3)>.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, Amsterdam, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 1976. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)>.
- DIAS, M. C.; BRÜGGEMANN, W. Water-use efficiency in *Flaveria* species under drought-stress conditions. **Photosynthetica**, Amsterdam, v. 48, n. 3, p. 469-473, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11099-010-0061-0>>
- FLOWERS, T. J.; MUNNS, R.; COLMER, T. D. Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. **Annals of Botany**, Oxford, v. 115, n. 3, p. 419-31, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/aob/mcu217>>.
- GASHAW, A.; THEERAWITAYA, C.; SAMPHUMPHUANG, T.; CHA-UM, S.; SUPAIBULWATANA, K. CPPU elevates photosynthetic abilities, growth performances and yield traits in salt stressed rice (*Oryza sativa* L. spp. indica) via free proline and sugar accumulation. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, Amsterdam, v. 108, p. 27-33, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2013.11.003>>.
- GEILFUS, C.M.; MITHÖFER, A.; MÜLLER, J. L.; ZÖRB, C.; MUEHLING, K. H. Chloride-inducible transient apoplastic alkalizations induce stomata closure by controlling abscisic acid distribution between leaf apoplast and guard cells in salt-stressed *Vicia faba*. **New Phytologist**, Lancaster, v. 208, n. 3, p. 803–816, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/nph.13507>>.
- GHARBI, E.; MATÍNEZ, J. P.; BENAHMED, H.; HICHRI, I.; DOBREV, P. I.; MOTYKA, V.; QUINET, M.; LUTTS, S. Phytohormone profiling in relation to osmotic adjustment in NaCl-treated plants of the halophyte tomato wild relative species *Solanum chilense* comparatively to the cultivated glycophyte *Solanum lycopersicum*. **Plant Science**,

Amsterdam, v. 258, p. 77-89, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.02.006>>.

HAJLAOUI, H.; AYEB, N. E.; GARREC, J. P.; DENDEN, M. Differential effects of salt stress on osmotic adjustment and solutes allocation on the basis of root and leaf tissue senescence of two silage maize. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 31, n. 1, p. 122-130, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.09.007>>.

HASEGAWA, P. M. Sodium (Na⁺) homeostasis and salt tolerance of plants. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 92, p. 19–31, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.03.001>>.

HELD, C.; SADOWSKI, G. Compatible solutes: Thermodynamic properties relevant for effective protection against osmotic stress. **Fluid Phase Equilibria**, Amsterdam, v. 407, p. 224-225, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fluid.2015.07.004>>.

LIU, X.; MAK, M.; BABLA, M.; WANG, F.; CHEN, G.; VELJANOSKI, F.; WANG, G.; SHABALA, S.; ZHOU, M.; CHEN, Z. Linking stomatal traits and expression of slow anion channel genes HvSLAH1 and HvSLAC1 with grain yield for increasing salinity tolerance in barley. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 5, n. 634, p. 1-12, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00634>>.

MILLER, G. L. Use of dinitrosalicilic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ac60147a030>>.

MUNNS, R.; JAMES, R.A.; GILLIHAM, M.; FLOWERS, T. J.; COLMER, T. D. Tissue tolerance: an essential but elusive trait for salt-tolerant crops. **Functional Plant Biology**, Melbourne, v. 43, n. 12, p. 1103-1113, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1071/FP16187>>.

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

NEGIN, B.; MOSHELION, M. The evolution of the role of ABA in the regulation of water-use efficiency: From biochemical mechanisms to stomatal conductance. **Plant Science**, Amsterdam, v. 251, p. 82-89, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.05.007>>.

REDDY, P. S.; JOGESWAR, G.; RASINENI, G. K.; MAHESWARI, M.; REDDY, A. R.; VARSHNEY, R. K.; KISHOR, P. B. K. Proline over-accumulation alleviates salt stress and protects photosynthetic and antioxidant enzyme activities in transgenic sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 94, p.104-103, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.05.014>>.

REGASSA, T. H.; WORTMANN, C. S. Sweet sorghum as a bioenergy crop: Literature review. **Biomass and bioenergy**, Amsterdam, v. 64, p. 348-355, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.052>>.

RODRIGUES, C. R. F.; SILVA, E. N.; MOURA, R. M. M.; ANJOS, D. C.; HERNANDEZ, F. F. F.; VIÉGAS, R. A. Physiological adjustment to salt stress in *R. communis* seedlings is associated with a probable mechanism of osmotic adjustment and a reduction in water lost by transpiration. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 54, p. 233-239, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.041>>.

SHABALA, S.; HARIADI, Y.; JACOBSEN, S. E. Genotypic difference in salinity tolerance in quinoa is determined by differential control of xylem Na⁺ loading and stomatal density. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 170, n. 10, p. 906-914, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.01.014>>.

SOUZA, R. P.; MACHADO, E. C.; SILVEIRA, J. A. G.; RIBEIRO, R. V. Fotossíntese e acúmulo de solutos em feijoeiro caupi submetido à salinidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 6, p.586-592, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011000600003>>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: ArtMed, 2013. p. 216 -221

TAVAKKOLI, E.; RENGASAMY, P.; MCDONALD, G. K. High concentrations of Na⁺ and Cl⁻ ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, n. 15, p. 4449–4459, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erq251>>.

TROUVERIE, J.; CHATEAU-JOUBERT, S.; THÉVENOT, C.; JACQUEMOT, M. P.; PRIOUL, J. L. Regulation of vacuolar invertase by abscissic acid or glucose in leaves and roots from maize plantlets. **Planta**, Berlin, v. 219, n. 5, p. 894-905, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00425-004-1289-3>>.

WILKINSON, S; DAVIES, W. J. Manipulation of the apoplastic pH of intact plants mimics stomatal and growth responses to water availability and microclimatic variation. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 59, n. 3, p. 619–631, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erm338>>.

WILLADINO, L.; GOMES, E. W. F.; SILVA, E. F. F.; MARTINS, L. S. S.; CAMARA, T. R. Efeito do estresse salino em genótipos tetraplóides de bananeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 1, p. 53-59, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000100008>>.

YEMM, E. W.; COCKING, E. C. The determination of aminoacid with ninhydrin. **Analyst**, London, v. 80, p. 209-213, 1955. Disponível em: <<https://doi.org/10.1039/AN9558000209>>. YEMM, E.W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plants extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, London, v. 57, n. 3, p. 508-514, 1954. Disponível em: <<https://doi.org/10.1042/bj0570508>>.

ZHU, M.; SHABALA, L.; CUIN, T. A.; HUANG, X.; ZHOU, M.; MUNNS, R.; SHABALA, S. Nax loci affect SOS1-like Na⁺/H⁺ exchanger expression and activity in wheat. **Journal of Experimental Botany**, Amsterdam, v. 61, n.15, p. 4449–4459, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erv493>>.

**5 ACÚMULO E DISTRIBUIÇÃO DE NUTRIENTES EM CULTIVARES DE
SORGO SACARINO SOB ESTRESSE SALINO**

Acúmulo e distribuição de nutrientes em cultivares de sorgo sacarino sob estresse salino

Resumo

A salinidade da água e do solo tem prejudicado a produção agrícola em diversas áreas do planeta. Para suportar os efeitos do estresse salino é preciso que as plantas desenvolvam mecanismos de defesa e adaptação ao excesso de sais, o que inclui absorção e compartilhamento de nutrientes de forma que não afete o seu crescimento. O objetivo desse estudo foi avaliar o efeito do estresse salino sobre o acúmulo e distribuição de nutrientes em cultivares de sorgo sacarino. O experimento foi conduzido em casa de vegetação utilizando delineamento experimental em blocos casualizados, com esquema fatorial 6 x 5. Foram testadas seis cultivares (BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2), soluções salinas com cinco valores de condutividade elétrica (0,0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12,0 dS m⁻¹), em três repetições. Após a colheita, foram determinados os teores e conteúdos de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Fe, Cu, Cl e Na em folhas, caules e raízes das plantas. Amostras de solo foram coletadas para determinação dos cátions trocáveis e solúveis, pH, CE_{es} e cálculo da RAS. O acúmulo de nutrientes em raízes, colmos e folhas das cultivares de sorgo sacarino foi limitado, principalmente, pela redução no crescimento com o aumento da salinidade. A competição entre nutrientes também contribuiu no desbalanceamento nutricional das cultivares de sorgo sacarino sob estresse salino, com Na afetando o acúmulo de Cu e P nas folhas, e Na, Ca e Mg interferindo no conteúdo de K das raízes. As cultivares de sorgo sacarino concentram nutrientes nas folhas quando em estresse salino severo para minimizar os danos causados pelo acúmulo de Na e Cl.

Palavras-chave: Salinidade, *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Conteúdo de nutrientes. Análise de Componentes Principais. Condutividade elétrica.

Accumulation and distribution of nutrients in sweet sorghum cultivars under salt stress

Abstract

The salinity of water and soil has hampered agricultural production in several areas of the planet. In order to withstand the effects of saline stress, plants need to develop mechanisms of defense and adaptation to salinity, including adequate absorption and sharing of nutrients in a way that does not affect their growth. The aim of this study was to evaluate the effect of salt stress on the accumulation and distribution of nutrients in sorghum cultivars. The experiment was conducted in greenhouse using a randomized block design in a 6 x 5 factorial. Six cultivars (BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 and 467-4-2) and saline solutions with five values of electrical conductivity (0.0, 1.5, 3.0, 7.0 and 12.0 dS m⁻¹) were tested, in three replicates. After the harvest, N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Fe, Cu, Cl and Na contents were determined in leaves, stems and roots of all plants. Soil samples were collected to determine exchangeable and soluble cations, pH, EC_{es} and SAR calculation. The accumulation of nutrients in roots, stems and leaves of sweet sorghum cultivars was limited mainly by the reduction of growth with increasing salinity. The competition among nutrients also contributed to the nutritional imbalance of sorghum cultivars under salt stress, with Na affecting the accumulation of Cu and P in the leaves, and Na, Ca and Mg interfering in the K content in the roots. Sorghum cultivars concentrate nutrients in the leaves when under severe salt stress to minimize damages caused by Na and Cl accumulation.

Keywords: Salinity, *Sorghum bicolor* L., Nutrients content. Principal Component Analysis. Electric Conductivity.

5.1 Introdução

O acúmulo de sais no solo e na água é um processo natural que ocorre principalmente em regiões áridas e semiáridas, devido às condições edafoclimáticas favoráveis nestes locais. Os solos salinizados normalmente apresentam elevados teores de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} e CO_3^{2-} , no entanto, os íons Na^+ e Cl^- são frequentemente dominantes (TAVAKKOLI; RENGASAMY; McDONALD, 2010).

A concentração de sais na solução do solo interfere diretamente no crescimento e desenvolvimento das plantas (FLOWERS; MUNNS; COLMER, 2015), em consequência de distúrbios nas relações planta-água causadas pelo baixo potencial osmótico do meio externo (BEN-GAL et al., 2009), da queda das trocas gasosas (GHARBI et al., 2017), e da redução da atividade de enzimas e proteínas (WILLADINO et al., 2011).

A longo prazo, o estresse salino pode acarretar problemas associados ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio (AHANGER; AGARWAL, 2017) e desbalanços nutricionais (KEUTGEN; PAWELZIK, 2009).

A capacidade das plantas em manter um balanço adequado de nutrientes nos seus órgãos mesmo sob estresse salino pode implicar em uma maior tolerância à salinidade. Principalmente quando se considera as funções vitais desempenhadas por esses elementos nas plantas (EPSTEIN; BLOOM, 2005).

Diversos estudos também tem comprovado o papel de alguns elementos no aumento da tolerância a estresses ambientais, a exemplo do K, Ca e Zn (CHEN et al., 2014; KEUTGEN; PAWELZIK, 2009; JAN et al., 2017; REDDY et al., 2011, WARAICH et al., 2011). Considerando-se que sob uma nutrição adequada a planta tenha maior habilidade em suportar níveis elevados de estresse, o equilíbrio de elementos no solo pode ser uma forma de maximizar a capacidade de tolerar ambientes sob alta salinidade.

Devido às limitações de cultivo em áreas salinizadas ou sem disponibilidade de água de boa qualidade para irrigação, o sorgo sacarino pode ser considerado uma alternativa viável, pois é considerado moderadamente tolerante ao estresse salino (ALMODARES; HADI; ARMADPOUR, 2008). No entanto, pouco se conhece sobre os mecanismos de absorção e distribuição de nutrientes utilizados por esta cultura e sua relação com a tolerância à salinidade.

Diante do exposto, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito dos sais na solução do solo sobre o acúmulo e distribuição de nutrientes em cultivares de sorgo sacarino.

5.2 Material e Métodos

O experimento foi implantado em casa de vegetação na área experimental da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), em Juazeiro, Bahia, Brasil (09°24'41''S/40°30'57''W, 368 m).

Foram avaliadas seis cultivares de sorgo sacarino (BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2) submetidas a cinco níveis de salinidade da água de irrigação (0,0; 1,5; 3,0; 7,0 e 12,0 dS m⁻¹), dispostas no delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 6 x 5, com três repetições.

O cultivo foi realizado em vasos de 20 litros preenchidos com uma camada inicial de 2 cm de brita e 15 kg de amostra de um ARGISSOLO AMARELO Distrófico latossólico, coletado na camada de 0,0 a 0,2 m (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição química e granulométrica do solo utilizado para o cultivo de sorgo sacarino sob diferentes níveis de salinidade

C.O. g kg ⁻¹	pH (1:2,5)	CE _{es} dS m ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	S	H+Al	T
			cmol _c dm ⁻³							
1,9	5,7	0,23	1,0	0,7	0,07	0,33	0,0	2,1	1,6	3,7
V	P	Cu	Fe	Mn	Zn	B	areia	silte	argila	
%	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³					g kg ⁻¹			
57	17	0,5	67,9	32,7	6,1	0,19	847	135	18	

C.O.- carbono orgânico (método Walkley-Black); CE_{es} - condutividade elétrica do extrato de saturação; Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ (extração em KCl 1 mol L⁻¹); H+Al [extração em Ca (C₂H₃O₂)₂, 1 mol L⁻¹, pH 7,0]; Na⁺, K⁺, P, Cu, Fe, Mn e Zn (extração por Mehlich-1); B (extração em água quente); S - soma de bases; T - capacidade de troca de cátions [S+(H+Al)]; V - saturação por bases

A irrigação com as soluções salinas foi iniciada duas semanas após a semeadura, quando também foi feito o desbaste das plântulas, deixando-se apenas uma por vaso. As águas de irrigação foram preparadas a partir dos sais NaCl, CaCl₂.2H₂O e MgSO₄.7H₂O, de modo a se obter proporção entre Na:Ca:Mg equivalente a 7:2:1 (AQUINO; LACERDA; GOMES-FILHO, 2007).

Para controle da irrigação, foram instalados lisímetros de pesagem em todos os vasos de um mesmo bloco. Os lisímetros foram equipados com células de carga (modelo TSD, AEPH, capacidade de 50 kg) instaladas sob uma plataforma metálica com dispositivo de coleta do excesso de água drenado. As células de carga foram conectadas a dois multiplexadores (AM16/32B, Campbell Scientific) ligados a um datalogger (CR1000, Campbell Scientific), o qual registrou leituras de massa a cada 15 minutos. A calibração do

equipamento foi realizada a partir de leituras de sinal (mV) após aplicações sucessivas de água até atingir a capacidade de campo. O intervalo de irrigação foi de 48 horas, efetuando a reposição do volume de água perdido, com adicional de 15% referente à fração de lixiviação.

A correção da fertilidade do solo foi feita através de aplicações de solução nutritiva, contendo 160, 400, 210, 150, 50 e 180 mg L⁻¹ de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, e 0,81; 1,33; 0,15; 3,66; 4,0; 0,1 mg L⁻¹ dos respectivos micronutrientes B, Cu, Mo, Mn, Zn e Fe (ALVAREZ V., 1974). As fontes utilizadas foram (NH₄)₂SO₄, KH₂PO₄, Na₂HPO₄.H₂O, Ca(NO₃)₂, MgSO₄, CaCl₂.2H₂O, H₃BO₃, CuSO₄.5H₂O, (NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O, MnSO₄.H₂O, ZnSO₄.H₂O, FeSO₄.7H₂O e NaEDTA. A aplicação de nutrientes foi iniciada após o desbaste e realizada em três parcelas, aplicando 500 mL, em intervalos de vinte dias.

Após a colheita, o solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado em malha de 2 mm para preparação da pasta de saturação e de amostra destinada à análise de cátions trocáveis. No extrato da pasta de saturação mediu-se a condutividade elétrica (CE_{es}) e o pH, e determinaram-se os cátions solúveis Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Na⁺, calculando-se a relação de adsorção de sódio – RAS (USSLS, 1954). Os cátions trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Na⁺) foram extraídos com acetato de amônio e determinados por fotometria de chama (K⁺ e Na⁺) e espectroscopia de absorção atômica (Ca²⁺, Mg²⁺) (USSLS, 1954).

As plantas foram separadas em folhas, colmos e raízes, colocadas para secar e determinada sua matéria seca. O material vegetal, seco e triturado, foi submetido à digestão nítrico-perclórica, sendo K e Na determinados por fotometria de chama, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe e Cu por espectrofotometria de absorção atômica; S por turbidimetria do sulfato e P por espectrofotometria UV-VIS (SILVA, 2009).

Para determinação de N, amostras foram submetidas à digestão sulfúrica e posterior quantificação pelo método de Kjeldahl (SILVA, 2009). Os teores de Cl⁻ foram determinados após extração em água e titulação com AgNO₃, com o indicador K₂Cr₂O₇ (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989). A partir da matéria seca das folhas, colmos e raízes e dos respectivos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Fe, Cu e Mn foram calculados os conteúdos dos nutrientes em cada parte da planta.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, utilizando o programa SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2011), ajustando-se os dados quantitativos a modelos de regressão quando significativos (p<0,05). Para comparação entre as cultivares foi realizado o teste de Scott Knott (p<0,05).

Os conteúdos de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Cu, Fe, Na e Cl, determinados em folhas, colmos (exceto Fe) e raízes (exceto Fe) foram avaliados a partir da análise de

componentes principais (ACP), utilizando o software Statistica®, versão 8.0. A ACP foi realizada na matriz de correlação, cujos dados são padronizados (média igual a zero e variância igual a um). Também se utilizou a análise da matriz de correlação de Pearson, para retirar as variáveis com baixa correlação entre si.

5.3 Resultados

A aplicação das soluções salinas com crescentes valores de condutividade elétrica promoveu aumento da salinidade do solo (Tabela 2), com incrementos significativos nos teores de cátions solúveis, principalmente Na^+ e consequente aumento da relação de adsorção de sódio (RAS). Com relação aos cátions trocáveis, verificou-se aumento da saturação por bases, principalmente pelo Ca^{2+} . O pH do solo, no entanto, apresentou tendência de redução com o aumento da salinidade.

Tabela 2 - Valores médios e desvio padrão de pH, condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es}), cátions solúveis, relação de adsorção de sódio (RAS), cátions trocáveis e saturação por bases (V) no solo ao final do ciclo do sorgo sacarino em função da aplicação de águas salinas

	CE_a (dS m^{-1})				
	0,0	1,5	3,0	7,0	12,0
pH _{es}	6,06 ± 0,06	5,78 ± 0,04	5,78 ± 0,02	5,74 ± 0,03	5,66 ± 0,03
CE_{es} (dS m^{-1})	0,70 ± 0,08	4,96 ± 0,34	7,40 ± 0,49	12,47 ± 0,63	14,38 ± 0,38
Ca^{2+} (mmol _c L ⁻¹)	2,03 ± 0,46	13,25 ± 1,63	16,68 ± 1,92	39,62 ± 4,28	40,06 ± 3,59
Mg^{2+} (mmol _c L ⁻¹)	0,84 ± 0,11	5,97 ± 0,60	10,61 ± 1,08	24,25 ± 3,03	27,04 ± 2,68
Na^+ (mmol _c L ⁻¹)	1,68 ± 0,28	29,23 ± 2,83	51,21 ± 9,41	143,19 ± 16,9	104,83 ± 7,15
K^+ (mmol _c L ⁻¹)	0,08 ± 0,01	0,19 ± 0,03	0,28 ± 0,04	0,48 ± 0,09	1,41 ± 0,14
RAS [(mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}]	1,84 ± 0,35	9,34 ± 0,77	13,95 ± 1,89	27,65 ± 2,81	17,83 ± 0,90
Ca^{2+} (cmol _c kg ⁻¹)	1,45 ± 0,05	1,65 ± 0,03	1,74 ± 0,06	2,33 ± 0,05	2,26 ± 0,05
Mg^{2+} (cmol _c kg ⁻¹)	0,19 ± 0,01	0,31 ± 0,01	0,34 ± 0,02	0,37 ± 0,01	0,44 ± 0,02
Na^+ (cmol _c kg ⁻¹)	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,14 ± 0,02	0,34 ± 0,04	0,29 ± 0,03
K^+ (cmol _c kg ⁻¹)	0,05 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,06 ± 0,00	0,13 ± 0,02
PST (%)	3,24 ± 0,27	3,24 ± 0,27	3,78 ± 0,54	9,19 ± 1,08	7,83 ± 0,81
V (%)	48,9 ± 1,64	57,5 ± 1,09	61,8 ± 2,19	83,6 ± 1,96	84,5 ± 2,15

A condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_{es}) manteve-se superior à condutividade elétrica da água de irrigação aplicada (CE_a) em todos os níveis de salinidade,

sendo as maiores diferenças observadas quanto menor a CE_a (Figura 1). A máxima CE_{es} estimada foi de 15,32 $dS\ m^{-1}$ para CE_a de 11,14 $dS\ m^{-1}$.

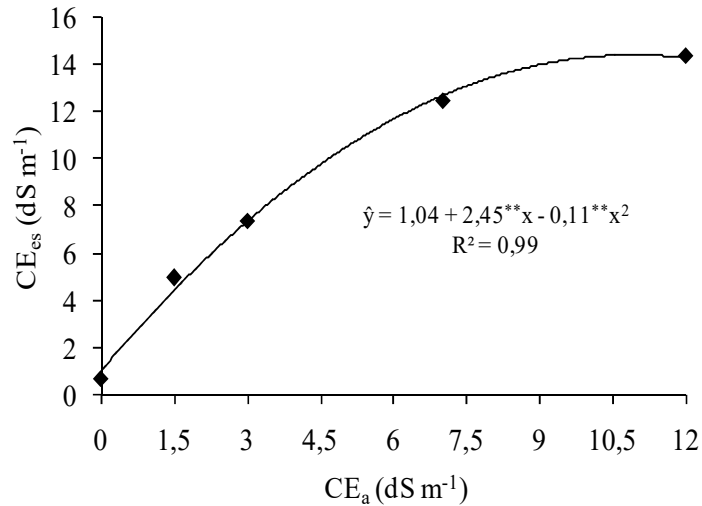


Figura 1 - Relação entre a condutividade elétrica das soluções salinas aplicadas (CE_a) e os valores de condutividade elétrica da extrato de saturação do solo (CE_{es}) ao final do ciclo. ** Coeficiente de regressão significativo ($p < 0,01$)

A partir da análise de componentes principais (ACP) nos conteúdos de N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Cu, Fe, Na e Cl, considerou-se somente as variáveis com autovalor (λ) superior a 1, pois indicam maior importância relativa de cada componente na explicação da variância associada ao conjunto de dados avaliados. Dessa forma, a variabilidade foi contida nas duas primeiras componentes, simbolizadas por CP1 e CP2 (Figura 2).

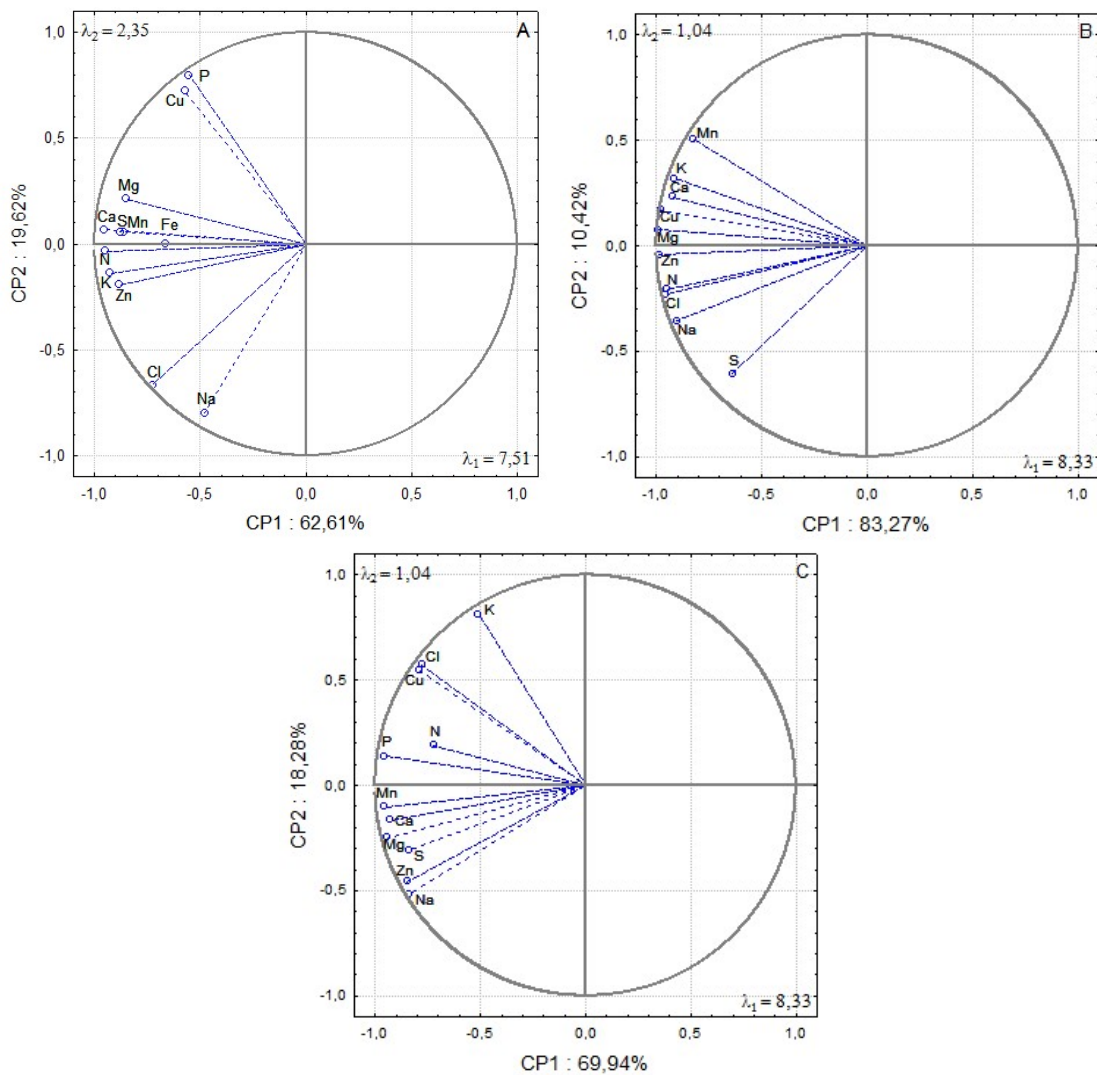


Figura 2 - Análise de Componentes Principais (ACP) com projeção do conteúdo de nutrientes e Na⁺ em folhas (A), colmos (B) e raízes (C) de cultivares de sorgo sacarino submetidas a diferentes níveis de salinidade

De forma acumulada, a CP1 e CP2 explicaram 82,23, 93,69 e 88,22% da variabilidade total dos dados, para folhas (Figura 2A), colmo (Figura 2B) e raízes (Figura 2C).

Nas folhas, a CP1 explica 62,61% da variância e correlaciona-se negativamente com os conteúdos de N, K, Ca, Mg, S, Mn, e Zn. Por sua vez, a CP2 corresponde a 19,62% da variância e está correlacionada positivamente com P e Cu, e negativamente com Na. O conteúdo de Cl teve contribuição tanto na CP1 como na CP2, estando mais correlacionado com a primeira componente (Figura 2A).

Nos colmos, 83,27% e 10,42% da variância foram explicados pela CP1 e CP2, respectivamente, sendo que a CP1 teve alta correlação negativa com o conteúdo de todos os

elementos avaliados (Figura 2B). Nenhum destes elementos teve correlação significativa com CP2.

Nas raízes, a CP1 apresentou correlação negativa com os conteúdos de N, P, Ca, Mg, S, Na, Cl, Mn, Zn e Cu, e explicou 69,94% da variância total dos dados, enquanto que a CP2 explicou apenas 18,28% tendo correlação significativa e positiva apenas com o conteúdo de K (Figura 2C).

Com a projeção sobre as cultivares do conteúdo de nutrientes e Na das folhas, observou-se a tendência de agrupamentos por semelhança (Figura 3). As cultivares Willey, SF11, SF-15 e TF 17 submetidas a CE_a de $12,0 \text{ dS m}^{-1}$ tiveram alta correlação negativa com CP1 e CP2. Para esta mesma CE_a , as cultivares 467-4-2 e BR 506 encontram-se correlacionadas negativamente com CP2 e positivamente com a CP1.

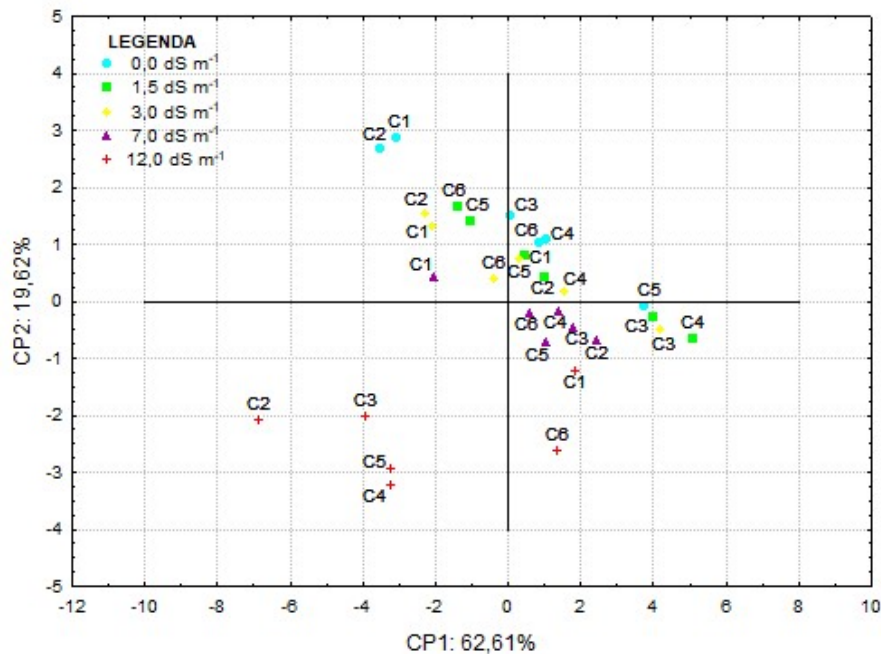


Figura 3 - Análise de Componentes Principais (ACP) do conteúdo de nutrientes e Na^+ em folhas com projeção nas cultivares de sorgo sacarino BR 506 (C1), Willey (C2), SF-11 (C3), SF-15 (C4), TF-17 (C5), 467-4-2 (C6) e níveis de salinidade ($0,0$; $1,5$; $3,0$; $7,0$ e $12,0 \text{ dS m}^{-1}$)

Os teores de N, P e K não diferiram entre as cultivares, no entanto, houve tendência de aumento de N e redução de P com o aumento da salinidade (Tabela 3). Para K, ocorreu redução até a CE_a de $4,0 \text{ dS m}^{-1}$ quando o teor atinge valor estimado em $1,11 \text{ dag kg}^{-1}$, havendo posterior aumento com o nível de salinidade.

Tabela 3 - Teores de N, P, K, Ca, Mg e S em folhas de cultivares de sorgo sacarino submetidas a diferentes níveis de salinidade

	CE _a (dS m ⁻¹)					Equação de regressão	R ²
	0,0	1,5	3,0	7,0	12,0		
N (dag kg ⁻¹)	7,24	7,68	8,08	9,13	16,31	$\hat{y} = 6,29 + 0,72^{**}x$	0,86
P (dag kg ⁻¹)	1,77	1,52	1,49	1,17	1,28	$\hat{y} = 1,63 - 0,40^{**}x$	0,77
K (dag kg ⁻¹)	1,42	1,33	1,04	1,46	2,74	$\hat{y} = 1,43 - 0,16^{**}x + 0,02^{**}x^2$	0,99
Ca (dag kg ⁻¹)							
BR 506	1,13 a ^{1/}	1,35 a	1,09 a	1,12 b	1,65 b	$\hat{y} = 1,24 - 0,07^*x + 0,01^{**}x^2$	0,76
Willley	1,32 a	1,53 a	1,21 a	1,47 a	2,05 a	$\hat{y} = 1,40 - 0,05x + 0,01^{**}x^2$	0,87
SF-11	1,11 a	1,00 b	0,87 b	0,84 c	1,64 b	$\hat{y} = 1,15 - 0,15^{**}x + 0,02^{**}x^2$	0,99
SF-15	1,12 a	0,96 b	0,95 b	0,80 c	1,59 b	$\hat{y} = 1,16 - 0,15^{**}x + 0,02^{**}x^2$	0,96
TF-17	1,19 a	0,99 b	0,90 b	1,06 b	2,13 a	$\hat{y} = 1,18 - 0,15^{**}x + 0,02^{**}x^2$	0,99
467-4-2	1,31 a	1,05 b	1,12 a	1,21 b	2,09 a	$\hat{y} = 1,27 - 0,12^{**}x + 0,02^{**}x^2$	0,98
Mg (dag kg ⁻¹)							
BR 506	0,40 a	0,59 b	0,63 b	0,80 a	0,71 a	$\hat{y} = 0,41 + 0,10^{**}x - 0,01^{**}x^2$	0,97
Willley	0,48 a	0,73 a	0,74 a	0,68 b	0,81 b	$\hat{y} = 0,57 + 0,04^{**}x - 0,002^*x^2$	0,52
SF-11	0,31 b	0,27 d	0,34 c	0,27 d	0,53 c	$\hat{y} = 0,32 - 0,029^*x + 0,004^{**}x^2$	0,86
SF-15	0,30 b	0,29 d	0,33 d	0,26 d	0,52 c	$\hat{y} = 0,33 - 0,029^*x + 0,004^{**}x^2$	0,85
TF-17	0,29 b	0,33 d	0,27 d	0,35 c	0,58 c	$\hat{y} = 0,31 - 0,015x + 0,003^{**}x^2$	0,97
467-4-2	0,38 a	0,40 c	0,42 d	0,43 c	0,66 b	$\hat{y} = 0,40 - 0,010x + 0,003^{**}x^2$	0,96
S (dag kg ⁻¹)							
BR 506	1,12 a	1,13 a	1,36 a	1,15 a	1,56 b	$\hat{y} = \bar{y}$	0,97
Willley	1,36 a	1,26 a	1,40 a	1,62 a	3,29 a	$\hat{y} = 1,04 + 0,15^{**}x$	0,82
SF-11	1,18 a	1,09 a	0,57 a	1,72 a	1,63 b	$\hat{y} = \bar{y}$	0,90
SF-15	1,16 a	0,92 a	0,82 a	0,91 a	1,38 b	$\hat{y} = \bar{y}$	0,96
TF-17	0,92 a	1,47 a	0,94 a	1,01 a	2,24 b	$\hat{y} = 0,91 + 0,09^*x$	0,55
467-4-2	1,45 a	1,35 a	0,91 a	1,27 a	4,81 a	$\hat{y} = 1,64 - 0,43x + 0,058^{**}x^2$	0,99

^{1/}Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade para cada nível de salinidade da água de irrigação. Coeficiente da regressão significativo com $p < 0,01$ (**) ou $p < 0,05$ (*)

Para Ca, os teores diferiram entre cultivares apesar de apresentarem a mesma tendência de redução até determinada CE_a, ocorrendo posterior aumento com os níveis de salinidade. Willey obteve teores mínimos de Ca para a CE_a de 2,5 dS m⁻¹, enquanto que o mesmo ocorreu para as cultivares SF-11, SF-15 e TF-17 apenas na CE_a de 3,75 dS m⁻¹.

Os teores de Mg nas cultivares BR 506 e Willey foram crescentes até as CE_a de 5,0 e 10,0 dS m⁻¹, respectivamente. Em contrapartida, o inverso ocorreu com as demais cultivares, atingindo valores mínimos com as CE_a de 3,63, 3,63, 2,50 e 1,70 dS m⁻¹ para SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2, respectivamente.

Os teores foliares de S entre as cultivares tiveram comportamentos bem distintos devido à salinidade. Para Willey e TF-17, houve aumento linear, enquanto que 467-4-2 teve

redução até a CE_a de $3,71 \text{ dS m}^{-1}$ ocorrendo posterior aumento com os níveis de salinidade. As demais cultivares não se ajustaram a nenhum modelo regressão.

Quanto aos micronutrientes, os teores de Mn foram crescentes para BR 506, Willey e SF-15 com o aumento da salinidade. SF-11, TF-17 e 467-4-2 tiveram redução até as CE_a de 4,89, 3,83, $4,75 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente, momento em que o comportamento inverte e ocorre aumento partir destes níveis de salinidade (Tabela 4).

Tabela 4 - Teores de Mn, Zn, Fe e Cu em folhas de cultivares de sorgo sacarino submetidas a diferentes níveis de salinidade

	CE_a (dS m^{-1})					Equação de regressão	R^2
	0	1,5	3,0	7,0	12,0		
Mn (mg kg^{-1})							
BR 506	143,5 b ^{1/}	225,2 a	222,1 a	302,7 b	337,9 b	$\hat{y} = 176,6 + 19,1^{**}x$	0,89
Willey	235,6 a	249,0 a	308,4 a	408,7 a	508,4 a	$\hat{y} = 230,7 + 23,7^{**}x$	0,99
SF-11	149,7 b	104,2 b	126,1 b	66,4 c	258,0 c	$\hat{y} = 158,5 - 34,0^{**}x + 3,48^{**}x^2$	0,89
SF-15	92,3 b	78,6 b	93,7 b	88,6 c	196,2 c	$\hat{y} = 70,2 + 8,44^{**}x$	0,71
TF-17	167,4 b	138,9 b	102,4 b	163,1 c	294,6 b	$\hat{y} = 160,4 - 20,3x + 2,65^{**}x^2$	0,97
467-4-2	202,3 a	180,5 a	153,0 b	135,8 c	330,2 b	$\hat{y} = 214,5 - 35,4^{**}x + 3,73^{**}x^2$	0,98
Zn (mg kg^{-1})							
BR 506	19,1 a	28,1 a	30,5 a	39,5 a	66,3 b	$\hat{y} = 19,5 + 3,06^{**}x$	0,96
Willey	27,6 a	28,2 a	38,6 a	39,1 a	74,1 b	$\hat{y} = 24,2 + 3,68^{**}x$	0,88
SF-11	22,1 a	18,1 a	28,6 a	19,4 b	40,0 c	$\hat{y} = 19,3 + 1,35^*x$	0,53
SF-15	19,8 a	19,2 a	23,2 a	20,5 b	36,4 c	$\hat{y} = 17,9 + 1,27^*x$	0,73
TF-17	12,3 a	17,8 a	14,5 a	18,4 b	42,8 c	$\hat{y} = 9,94 + 2,34^{**}x$	0,82
467-4-2	20,6 a	24,7 a	31,4 a	29,6 a	112,9 a	$\hat{y} = 10,6 + 7,07^{**}x$	0,78
Cu (mg kg^{-1})							
BR 506	17,6 a	12,5 a	12,9 a	7,9 a	9,9 b	$\hat{y} = 17,1 - 2,20^{**}x + 0,13^{**}x^2$	0,92
Willey	17,6 a	13,0 a	13,8 a	7,8 a	11,1 b	$\hat{y} = 17,5 - 2,27^{**}x + 0,14^{**}x^2$	0,88
SF-11	14,7 b	11,0 a	7,5 b	5,8 a	7,9 b	$\hat{y} = 14,3 - 2,44^{**}x + 0,16^{**}x^2$	0,97
SF-15	10,5 c	11,2 a	6,6 b	6,9 a	7,7 b	$\hat{y} = 11,0 - 1,16^*x + 0,07^*x^2$	0,66
TF-17	10,1 c	11,2 a	6,4 b	6,0 a	9,8 b	$\hat{y} = 11,1 - 1,55^{**}x + 0,12^{**}x^2$	0,68
467-4-2	14,5 b	11,8 a	6,4 b	7,3 a	15,2 a	$\hat{y} = 14,4 - 2,88^{**}x + 0,25^{**}x^2$	0,93
Fe (mg kg^{-1})							
BR 506	187,8 a	228,5 a	245,2 a	231,8 a	248,8 b	$\hat{y} = \bar{y}$	0,97
Willey	189,6 a	227,5 a	195,4 a	211,3 a	224,9 b	$\hat{y} = \bar{y}$	0,99
SF-11	223,3 a	154,8 a	232,3 a	135,6 a	331,2 b	$\hat{y} = 228,0 - 30,4x + 3,19^*x^2$	0,70
SF-15	201,3 a	273,9 a	303,0 a	278,0 a	340,0 b	$\hat{y} = \bar{y}$	0,99
TF-17	176,2 a	193,2 a	237,1 a	212,9 a	335,8 b	$\hat{y} = 176,3 + 11,6^{**}x$	0,80
467-4-2	198,9 a	153,9 a	239,6 a	161,7 a	582,1 a	$\hat{y} = 222,5 - 41,0^*x + 5,81^{**}x^2$	0,90

^{1/}Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. Coeficiente da regressão significativo com $p < 0,01$ (**) ou $p < 0,05$ (*)

Os teores foliares de Zn para todas as cultivares aumentaram linearmente com os níveis crescentes de salinidade (Tabela 4). Por outro lado, houve redução nos teores de Cu até as CE_a de 8,46, 8,11, 7,63, 8,29 e 5,76 $dS\ m^{-1}$ das cultivares BR 506, Willey, SF-11, SF-15, TF-17 e 467-4-2, respectivamente, tendo aumento após estes valores de CE_a .

Os teores de Fe foram bem distintos quando se compara as cultivares entre os níveis de salinidade, não havendo regressão significativa que explique este comportamento para BR 506, Willey e SF-15. A cultivar TF-17, por sua vez, teve aumento linear nos teores de Fe, enquanto que em SF-11 e 467-4-2 houve decréscimos até CE_a de 4,76 e 7,06 $dS\ m^{-1}$, respectivamente, também aumentando após estes valores de CE_a .

5.4 Discussão

O uso de água salina demonstra ser uma alternativa viável para irrigação de culturas consideradas tolerantes à salinidade, a exemplo das cultivares de sorgo sacarino estudadas. No entanto, é importante a realização de um manejo adequado dessas águas de forma que evite a superelevação da salinidade, degradando o solo.

Como observado neste trabalho, a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_{es}), no final do ciclo de cultivo, foi superior à condutividade elétrica da água de irrigação (CE_a). As diferenças observadas entre CE_{es} e CE_a , principalmente nos primeiros níveis de salinidade, são devido às maiores taxas de evapotranspiração nessas situações, necessitando de um maior volume de água salina para reposição da umidade, o que ocasiona maior concentração de sais no solo (ARAGÜES et al., 2014b).

Uma fração de lixiviação superior para os menores níveis de salinidade poderia auxiliar na retirada desse excesso de sais, no entanto, isto poderia causar maior lixiviação dos nutrientes aplicados, via solução nutritiva, e comprometer a disponibilidade destes elementos essenciais às plantas.

A concentração de sais na solução do solo pode ser observada a partir do aumento dos teores de cátions solúveis com a salinidade, principalmente de Na^+ até a CE_a de 7,0 $dS\ m^{-1}$, havendo elevação da relação de adsorção de sódio (RAS). Este fato se deve à alta concentração de Na^+ nas soluções salinas, como também pode estar associado a alguma restrição para absorver Na^+ com o agravamento do estresse (WANG et al., 2016), ou a algum mecanismo que realiza a extrusão de Na^+ (LIU; WANG; ZHANG, 2015).

Entre os cátions trocáveis houve maior preferência pelo Ca^{2+} no complexo de troca, o que elevou a saturação por Ca^{2+} e evitou problemas com a sodificação, que afetaria a

estabilidade estrutural e a condutividade hidráulica do solo (ARAGÜES et al., 2014a) principalmente nos níveis de salinidade mais baixos.

Apesar de haver aumento da saturação por bases, houve sensível redução do pH do solo com o aumento da salinidade, o que provavelmente se deve à ausência de carbonatos e bicarbonatos nas soluções salinas e presença de sulfato de amônio na solução nutritiva aplicada. Com a redução na taxa de absorção de nutrientes à medida que houve aumento da salinidade, o NH_4^+ não absorvido pode ter sofrido oxidação, contribuindo para acidificação do solo.

A alteração na composição química do solo causada pela salinização refletiu diretamente no acúmulo e distribuição de nutrientes nas plantas. Através da Análise de Componentes Principais (ACP) foi possível verificar dois fenômenos intimamente relacionados com o conteúdo de nutrientes das folhas, colmos e raízes. Nesse caso, a primeira componente principal (CP1) está diretamente associada à redução do crescimento devido ao estresse salino, o que causou a redução da matéria seca e refletiu no decréscimo do conteúdo dos nutrientes.

As perdas de matéria seca estão relacionadas com a dificuldades de absorção de água pelas raízes, causando fechamento estomático e limitando à fotossíntese (GHARBI et al, 2017), como também pelos efeitos deletérios do acúmulo de íons em excesso como Na^+ e Cl^- , perturbando a regulação estomática, causando danos ao aparato fotossintético (TAVAKKOLI; RENGASAMY; MCDONALD, 2010) e dificultando a absorção de nutrientes (CHEN et al, 2014).

Para resistir às condições de estresse salino são necessários mecanismos que favoreçam a homeostase iônica e osmótica, como a manutenção da pressão de turgor celular, compartimentalização de íons em excesso nos vacúolos ou extrusão de íons e síntese de solutos compatíveis. Entretanto, esses mecanismos demandam bastante energia, que deixa de ser investida em crescimento (FLOWERS; MUNNS; COLMER, 2015).

A segunda componente principal (CP2), apesar de contribuir com uma menor fração na explicação da variância dos dados, demonstra que o acúmulo de um elemento pode ser afetado por outro.

Essa competição pode ser explicada pela semelhança de alguns mecanismos de transporte que conduzem os nutrientes de célula a célula, desde a raiz, a partir de transportadores específicos (POTTOSIN; DOBROVINSKAYA, 2014; PINTO; FERREIRA, 2015; MEHDI-TOUNSI et al., 2017).

Tomando como base a explicação das componentes principais, o conteúdo de nutrientes e Na nas folhas teve redução com o aumento da salinidade, predominantemente devido às perdas de matéria seca à medida que o estresse salino foi intensificado. No entanto, ainda foi possível observar que o Na teve relação negativa com o acúmulo de P e Cu nas folhas.

A remoção e sequestro de Na^+ para os vacúolos desde as células das raízes são mecanismos que demandam alta atividade de bomba de prótons ATPases e pirofosfatases (DABBOUS et al, 2017), o que pode refletir em alto consumo de P na raiz limitando seu transporte até as folhas, ou causar distribuição de P das folhas para raiz (GU et al., 2016).

Navarro et al. (2001) também verificaram que altos níveis de NaCl reduziram o fluxo de P através do xilema para a parte aérea e relacionaram isto a uma possível acumulação de P nos vacúolos das raízes de meloeiro.

O acúmulo de Cu nas folhas, por sua vez, tem correlação negativa com o conteúdo de Na, provavelmente devido à relação direta deste elemento com o estresse salino, que interferiu de alguma forma no transporte de Cu para as folhas. Considerando que o transporte de Cu demanda gasto de energia (DECHEN; NACHTIGALL, 2006), esta pode ter sido direcionada para outras funções relacionadas ao estresse.

Quanto ao conteúdo dos nutrientes e Na nos colmos, o que se observa é uma relação ainda mais intimamente relacionada às perdas de matéria seca devido ao estresse salino, uma vez que os elementos avaliados tiveram maior correlação com a CP1, tendo baixa correlação com a CP2.

O fluxo facilitado de nutrientes através do xilema devido a sua estrutura (BOLLHÖNER; PRESTELE; TUOMINEN, 2012) pode ter minimizado o efeito antagônico entre elementos nesse compartimento e compensado certas restrições de transporte via floema (EPSTEIN; BLOOM, 2005), principalmente quando se considera a conexão entre vasos do xilema e floema, favorecendo a redistribuição de nutrientes na planta (PÉREZ-ALFOCEA et al., 2000).

Nas raízes, também se verificou elevada contribuição da redução do crescimento sobre o conteúdo de nutrientes e Na. No entanto, o efeito de competição entre K e os elementos Na, Ca e Mg, ficou evidente, provavelmente devido ao desbalanceamento causado pelas aplicações das soluções salinas.

Nesse caso, a existência de um elevado gradiente eletroquímico devido aos maiores teores desses elementos nas soluções do solo foi bastante favorável para absorção de Na, Ca e Mg através de canais iônicos não seletivos (PINTO; FERREIRA, 2015). Em contrapartida, a

absorção de K ficou restrita a um transporte do tipo K^+/H^+ simporte, K^+/Na^+ simporte ou $cátion/H^+$ antiporte para superar o menor gradiente de potencial eletroquímico deste elemento (NIEVES-CORDONES et al., 2014)

No entanto, não foi detectado nenhum efeito de competição entre Na, K, Ca e Mg nas folhas, o que demonstra que neste órgão existe algum mecanismo de regulação que garante maior seletividade de íons, a exemplo de K^+ e Ca^{2+} em relação a Na^+ (MEHDI-TOUNSI et al., 2017). A regulação de K^+ e Ca^{2+} e a prevenção do influxo de Na^+ , são estratégias comumente usadas pelas plantas para manter proporções K^+/Na^+ e Ca^{2+}/Na^+ desejáveis no citosol (MORGAN et al., 2014; WANG et al., 2016), principalmente sob estresse salino.

O comportamento das cultivares de sorgo sacarino quanto ao padrão de acumulação de nutrientes nas folhas, demonstrou o quanto as cultivares Willey, SF11, SF-15 e TF 17 foram igualmente afetadas de forma severa quando submetidas à CE_a de $12,0 \text{ dS m}^{-1}$, enquanto que a BR 506 se mostrou superior. Para esta mesma CE_a , a cultivar 467-4-2 se diferenciou das demais devido a sua morte aos 67 dias após o plantio, demonstrando que esta cultivar não tolerou o elevado nível de salinidade aplicado.

As cultivares BR 506 e Willey não submetidas ao estresse salino se destacaram em relação às demais cultivares não estressadas. Esse fato se deve ao ciclo precoce dessas duas cultivares, o que proporcionou um padrão diferenciado na absorção de nutrientes para manutenção do seu crescimento.

A partir da análise individual dos teores de nutrientes nas folhas, observou-se que estes foram diretamente afetados com o aumento da salinidade. Nesse caso, houve respostas distintas tanto em relação ao elemento em questão quanto para cultivar avaliada.

Com o aumento da salinidade, acréscimos lineares foram observados para N independente da cultivar, o que demonstra o efeito de concentração deste elemento devido ao menor crescimento das plantas em níveis de salinidade mais elevado. Keutgen e Pawelzik (2009) também verificaram aumento nos teores de N em folhas de cultivares de morango sob alto nível de estresse por NaCl, e associaram à síntese de compostos orgânicos relacionados ao ajustamento osmótico como proteínas, aminoácidos e amidas.

Por outro lado, os teores foliares de P decresceram linearmente com o aumento da salinidade independente da cultivar avaliada, o que demonstra a sensibilidade da planta na assimilação deste nutriente quando em estresse salino e sua relação direta com a redução do crescimento. Mehdi-Tounsi et al. (2017) também verificaram diminuição significativa do teor foliar de P à medida que a salinidade da água de irrigação aumentou em plantas de pistache.

Considerando a quantidade de P aplicada através da solução nutritiva e que o pH do solo foi favorável para evitar problemas de indisponibilidade de P associado ao Ca e Mg, é possível que os menores teores de P estejam relacionados a algum efeito inibitório ocasionado pelo estresse salino sobre os transportadores deste elemento nas plantas. A ausência de resposta em plantas de pinhão manso (SOUSA et al., 2011) e sorgo forrageiro (LACERDA et al., 2006), sob salinidade quando suplementadas com P reforçam estas informações. Ruppenthal (2016) verificou que a adição de NaCl na solução de cultivo inibiu o efeito positivo de P no crescimento de sorgo.

Quanto aos teores de K nas folhas, observou-se a redução até CE_a estimada em $4,0 \text{ dS m}^{-1}$, demonstrando que as perdas de matéria seca das plantas de sorgo até este nível de salinidade ocorreram em escala inferior à depleção deste elemento nas folhas. No entanto, a partir desta CE_a ocorreram acréscimos nos teores de K, o que é uma resposta interessante, devido ao papel deste elemento na regulação osmótica e minimização do estresse salino.

Jan et al. (2017) verificaram que a suplementação com K e Zn minimizaram os efeitos do estresse salino em trigo. Ahanger e Agarwal (2017), também trabalhando com trigo, verificaram que K exerceu papel importante sobre o metabolismo antioxidante em plantas sobre estresse induzido por NaCl.

Como mecanismo de sobrevivência ao estresse salino, Wang et al. (2016) observaram que a cevada selvagem (*Hordeum brevisubulatum*) realiza o acúmulo rápido de Na^+ na parte aérea para responder ao choque salino inicial e, posteriormente, desencadeia o efluxo de Na^+ simultaneamente com o influxo de K^+ para manter um equilíbrio entre esses elementos.

Nesse caso, pode-se esperar um mecanismo semelhante realizado pelas cultivares de sorgo sacarino para minimizar os efeitos do estresse salino, não somente com este elemento, mas também assimilando mais Ca, Mg, Mn, Zn e Fe nas folhas, os quais tiveram acréscimos significativos em seus teores nos níveis de salinidade mais severos para todas cultivares.

Em contrapartida, a produção de grãos fica comprometida e os nutrientes deixam de ser translocados para este órgão, que é considerado dreno principal da planta na fase final do seu ciclo (FRANCO, 2011).

As demais diferenças verificadas nos teores de nutrientes nas folhas entre as cultivares de sorgo sacarino devem estar relacionadas com a diversidade genética dos mesmos, as quais refletem diferenças no padrão de crescimento, absorção e distribuição de nutrientes (PAIVA et al., 2017), inclusive sob estresses ambientais.

Outro ponto importante é que, quando se compararam os teores foliares de nutrientes com os obtidos por Franco (2011) em genótipos de sorgo com produtividade dentro da

esperada, durante a mesma fase de coleta (grão pastoso/leitoso), constatou-se que os valores foram superiores ao deste autor nos diferentes níveis de salinidade, exceto para Mn em SF-11 e SF-15.

No entanto, os valores de referência de Mn para diagnose foliar em sorgo realizada na fase de emborrachamento (MARTINEZ; CARVALHO;SOUZA, 1999) é três vezes menor à encontrada por Franco (2011) e bem inferior aos determinados neste estudo.

Dessa forma, é possível afirmar que os efeitos deletérios do estresse salino sobre o crescimento das cultivares de sorgo sacarino não tiveram relação com alguma ocorrência de deficiência nutricional. Inclusive, pode-se considerar que o reforço dado com a aplicação da solução nutritiva minimizou os danos causados pelo estresse salino ao permitir a assimilação de nutrientes com conhecido papel na regulação de estresses e reduzir a atividade de íons tóxicos como Na^+ e Cl^- .

Yu et al. (2016) afirmaram que a capacidade de controlar a homeostase de Na^+ , Cl^- , K^+ e Mg^{2+} em condições de salinidade é uma característica de culturas tolerantes à salinidade.

Portanto, pode-se destacar a importância do reforço nutricional em plantas sob estresse salino para contribuir com a sua maior tolerância a essas condições, desde que não represente um acréscimo significativo da salinidade, que poderia agravar ainda mais o estresse.

5.5 Conclusões

O acúmulo de nutrientes nos diferentes órgãos das cultivares de sorgo sacarino é limitado principalmente pela redução do crescimento com o aumento da salinidade.

A competição entre nutrientes também tem contribuição no desbalanceamento nutricional das cultivares de sorgo sacarino sob estresse salino, com Na afetando o acúmulo de Cu e P nas folhas, e Na, Ca e Mg interferindo no conteúdo de K das raízes.

As cultivares de sorgo sacarino concentram nutrientes nas folhas quando em estresse salino severo para minimizar os danos causados pelo acúmulo de Na e Cl.

Referências

- AHANGER, M. A.; AGARWAL, R. M. Salinity stress induced alterations in antioxidant metabolism and nitrogen assimilation in wheat (*Triticum aestivum* L) as influenced by potassium supplementation. **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 115, p. 449-460, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.04.017>>.
- ALMODARES, A.; HADI, M. R.; ARMADPOUR, H. Sorghum stem yield and soluble carbohydrates under different salinity levels. **African Journal of Biotechnology**, Ebène, v.7, n.22, p.4051-4055, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.5897/AJB08.156>>.
- ALVAREZ V., V. H. **Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofres em dois latossolos de Minas Gerais**. 1974. 125 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1974.
- AQUINO, A. J. S.; LACERDA, C. F.; GOMES-FILHO, E. Crescimento, partição de matéria seca e retenção de Na⁺, K⁺ e Cl⁻ em dois genótipos de sorgo irrigados com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 961-971, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000500013>>.
- ARAGÜES, R.; MEDINA, E. T.; CLAVERÍA, I.; MARTÍNEZ-COB, A.; FACI, J. Regulated deficit irrigation, soil salinization and soil sodification in a table grape vineyard drip-irrigated with moderately saline waters. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 134, p. 84-93, 2014a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.019>>.
- ARAGÜES, R.; MEDINA, E. T.; MARTÍNEZ-COB, A.; FACI, J. Effects of deficit irrigation strategies on soil salinization and sodification in a semiarid drip-Irrigated peach orchard. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 142, p. 1-9, 2014b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.004>>.
- BEN-GAL, A.; BOROCHOV-NEORI, H. YERMIYAHU, U., SHANI, U. Is osmotic potential a more appropriate property than electrical conductivity for evaluating whole-plant response to salinity? **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 65, p. 232-237, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.09.006>>.
- BOLLHÖNER, B.; PRESTELLE, J.; TUOMINEN, H. Xylem cell death: emerging understanding of regulation and function. **Journal of Experimental Botany**, Amsterdam, v. 63, n. 3, p. 1081–1094, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/err438>>.
- CHEN, S.; HAWIGHORST, P.; SUN, J.; POLLE, A. Salt tolerance in *Populus*: Significance of stress signaling networks, mycorrhization, and soil amendments for cellular and whole-plant nutrition. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 107, p. 113–124, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.06.001>>.
- DABBOUS, A.; SAAD, R. B.; BRINI, F.; FARHAT-KHEMEKHEM, A.; ZORRIG, W.; ABDELY, C.; HAMED, K. B. Over-expression of a subunit E1 of a vacuolar H⁺-ATPase gene (*Lm VHA-E1*) cloned from the halophyte *Lobularia maritima* improves the tolerance of *Arabidopsis thaliana* to salt and osmotic stresses. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 137, p.128-141, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.013>>.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 327-354.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**, 2 ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 400p.

FERREIRA, D. F. **Programa de análises estatísticas (statistical analysis software) e planejamento de experimentos – SISVAR 5.6** (Build 86). Lavras: DEX/UFLA, 2011.

FLOWERS, T. J.; MUNNS, R.; COLMER, T. D. Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. **Annals of Botany**, Oxford, v. 115, n. 3, p. 419-31, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/aob/mcu217>>.

FRANCO, A. A. N. **Marcha de absorção e acúmulo de nutrientes na cultura do sorgo**. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido) - Universidade Federal de Montes Claros, Janaúba, MG, 2011.

GHARBI, E.; MATÍNEZ, J. P.; BENAHMED, H.; HICHRI, I.; DOBREV, P. I.; MOTYKA, V.; QUINET, M.; LUTTS, S. Phytohormone profiling in relation to osmotic adjustment in NaCl-treated plants of the halophyte tomato wild relative species *Solanum chilense* comparatively to the cultivated glycophyte *Solanum lycopersicum*. **Plant Science**, Amsterdam, v. 258, p. 77-89, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.02.006>>.

GU, M.; CHEN, A.; SUN, S.; SHU, G. Complex regulation of plant phosphate transporters and the gap between molecular mechanisms and practical application: what is missing? **Molecular Plant**, Amsterdam, v. 9, n. 3, p. 396-416, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.12.012>>.

JAN, A. U.; HADI, F.; MIDRARULLAH; NAWAZ, M. A.; HAHMAN, K. Potassium and zinc increase tolerance to salt stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 166, p. 139–149, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.008>>.

KEUTGEN, A. J.; PAWELZIK, E. Impacts of NaCl stress on plant growth and mineral nutrient assimilation in two cultivars of strawberry. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 65, n. 2-3, p. 170-176, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.08.002>>.

LACERDA, C. F., MORAIS, H. M. M., PRISCO, J. T., GOMES-FILHO, E., BEZERRA, M. A. Interação entre salinidade e fósforo em plantas de sorgo forrageiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 37, 258-263, 2006.

- LIU, M.; WANG, T. Z.; ZHANG, W. H. Sodium extrusion associated with enhanced expression of SOS1 underlies different salt tolerance between *Medicago falcata* and *Medicago truncatula* seedlings. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 110, p. 46–55, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.09.005>>.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201 p.
- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. **Diagnose foliar**. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). *Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p.143-168.
- MEHDI-TOUNSI, H.; CHELLI-CHAABOUNI, A.; MAHJOUB-BOUJNAH, D.; BOUKHRIS, M. Long-term Field response of pistachio to irrigation water salinity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 185, p. 1-12, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.003>>.
- MORGAN, S. H.; MAITY, P. J.; GEILFUS, C. M.; LINDBERG, S.; MÜHLING, K. H. Leaf ion homeostasis and plasma membrane H⁺-ATPase activity in *Vicia faba* change after extra calcium and potassium supply under salinity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 82, p. 244–253, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.06.010>>.
- NAVARRO, J. M.; BOTELLA, M. A.; CERDÁ, A.; MARTINEZ, V. Phosphorus uptake and translocation in salt-stressed melon plants. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 158, p. 375-381, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1078/0176-1617-00147>>.
- NIEVES-CORDONES, M.; ALEMAN, F.; MARTINEZ, V.; RUBIO, F. K⁺ uptake in plant roots. The systems involved, their regulation and parallels in other organisms. **Journal Plant Physiology**, Amsterdam, v. 171, p. 688-695, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.09.021>>.
- PAIVA, C. L.; QUEIROZ, V. A. V.; SIMEONE, M. L. F.; SCHAFFERT, R. E.; OLIVEIRA, A. C.; SILVA, C. S. Mineral content of sorghum genotypes and the influence of water stress. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 214, p. 400-405, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.067>>.
- PÉREZ-ALFOCEA, F.; BALIBREA, M. E.; ALARCÓN, J. J.; BOLARÍN, M. C. Composition of xylem and phloem exudates in relation to the salt-tolerance of domestic and wild tomato species. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 156, n. 3, p. 367-374, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(00\)80075-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(00)80075-9)>.
- PINTO, E.; FERREIRA, I. P. L. V. O. Cation transporters/channels in plants: Tools for nutrient biofortification. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 179, p. 64-82, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2015.02.010>>.

POTTOSIN, I; DOBROVINSKAYA, O. Non-selective cation channels in plasma and vacuolar membranes and their contribution to K^+ transport. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 171, p. 732-742, 2014. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2013.11.013>>.

REDDY, A. S.; ALI, G.S.; CELESNIK, H.; DAY, I.S. Coping with stresses. Roles of calcium- and calcium/calmodulin-regulated gene expression. **Plant Cell**, Rockville, v. 23, p. 2010-2032, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1105/tpc.111.084988>>.

RUPPENTHAL, V. **Respostas fisiológicas e bioquímicas de plântulas de sorgo sob estresse salino e supridas com silício e fósforo**. 2016. 155 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)-Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. p. 194-231.

SOUSA, A. E. C.; GHERY, H. R.; CORREIA, K. G.; SOARES, F. A. L.; NOBRE, R. G. Crescimento e consumo hídrico de pinhão manso sob estresse salino e doses de fósforo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 310-318, 2011. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902011000200008>>.

TAVAKKOLI, E.; RENGASAMY, P.; MCDONALD, G. K. High concentrations of Na^+ and Cl^- ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, n. 15, p. 4449–4459, 2010. Disponível em: < <https://doi.org/10.1093/jxb/erq251>>.

UNITED STATES SALINITY LABORATORY STAFF - USSLS. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Department of Agriculture, 1954. p. 82-134. (Agriculture Handbook No. 60)

WANG, C. M.; XIA, Z. R.; WU, G. Q.; YUAN, H. J.; WANG, X. R.; LI, J. L.; TIAN, F. P.; ZHANG, Q.; ZHU, X. Q.; HE, J. J.; KUMAR, T.; WANG, X. L.; ZHANG, J. L. The coordinated regulation of Na^+ and K^+ in *Hordeum brevisubulatum* responding to time of salt stress. **Plant Science**, Amsterdam, v.252, p. 358-366, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.08.009>>

WARAICH, E .A., AMAD, R., ASHRAF, M. Y., SAIFULLAH, AHMAD, M. Improving agricultural water use efficiency by nutrient management. **Soil & Plant Science**, Abingdon, v. 61, n. 4, p. 291-304, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2010.491954>>.

WILLADINO, L.; OLIVEIRA FILHO, R.A.; SILVA JÚNIOR, E. A.; GOUVEIA NETO, A.; CÂMARA, T. R. Salinity stress in two varieties of sugar cane:enzymes of the antioxidant system and chlorophyll fluorescence. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 417-422, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902011000200022>>.

YU, Y.; XU, T.; LI, X.; TANG, J.; MA, D.; LI, Z.; SUN, J. NaCl-induced changes of ion homeostasis and nitrogen metabolism in two sweet potato (*Ipomoea batatas*L.) cultivars exhibit different salt tolerance at adventitious root stage. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 129, p. 23-36, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.12.006>>.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entre as cultivares estudadas, BR 506, TF-17 e 467-4-2 são mais recomendadas para plantio em áreas com problemas de salinidade ou para utilização de águas inadequadas para irrigação, sendo que BR 506 provavelmente é a mais adequada para a produção de etanol.

O aumento da salinidade causa redução significativa da atividade fotossintética das cultivares de sorgo sacarino, no entanto, a cultivar BR 506 demonstra ser a mais eficiente.

O fechamento estomático, o aumento da eficiência intrínseca do uso da água e o ajustamento osmótico representam alguns mecanismos de adaptação às condições de estresse salino nas cultivares de sorgo sacarino trabalhadas, sendo os açúcares solúveis, principalmente os não redutores, os mais importantes no processo de osmorregulação.

O acúmulo de nutrientes em sorgo sacarino é limitado predominantemente pela redução do crescimento devido ao agravamento da salinidade e, em menor escala, pela competição entre elementos no solo, refletindo em diferenças no seu conteúdo em folhas e raízes.

O reforço nutricional em plantas de sorgo sacarino sob estresse salino pode contribuir com a sua tolerância à salinidade, desde que não represente acréscimo significativo à salinidade do solo.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Análise de variância (ANOVA) entre cultivares de sorgo sacarino, níveis de condutividade elétrica (CE_a) das soluções salinas e interação cultivares x CE_a para variáveis de crescimento testadas

Quadrado Médio									
Fonte de Variação	Ht ^{1/}	Ø ^{2/}	NPf ^{3/}	MFPA ^{4/}	MSPA ^{5/}	CA ^{6/}	SST ^{7/}	AFE ^{8/}	MSF ^{8/}
Cultivares	10.453**	54,7**	25,7**	37.648**	38.242**	663.19**	28,79**	9.620**	212,8**
CE _a	168.476**	119,8**	0,82 ^{ns}	1.148.486**	207.340**	1.060,23**	407,66**	4.651**	790,6**
Cultivares x CE _a	2.888**	8,0*	0,50 ^{ns}	13.383*	3.342*	138,47*	18,29**	2.089 ^{ns}	11,9 ^{ns}
Resíduo	581	4,6	0,8	3.584	1.856	62,85	4,85	1.268	10,73
CV (%)	13,0	16,2	35,5	15,1	21,2	12,1	16,2	41,1	14,9

^{1/} altura da planta; ^{2/} diâmetro do colmo; ^{3/} número de perfilhos; ^{4/} matéria fresca da parte aérea; ^{5/} matéria seca da parte aérea; ^{6/} conteúdo de água dos colmos; ^{7/} sólidos solúveis totais, ^{8/} área foliar específica, ^{9/} matéria seca das folhas. ** p<0,01, *p<0,05 e ^{ns} não significativo

APÊNDICE B – Análise de variância (ANOVA) entre cultivares de sorgo sacarino, níveis de condutividade elétrica (CE_a) das soluções salinas e interação cultivares x CE_a para trocas gasosas

Quadrado Médio								
Fonte de Variação	P _{n1} ^{1/}	g _{s1} ^{2/}	T _{p1} ^{3/}	EIUA ₁ ^{4/}	P _{n2} ^{5/}	g _{s2} ^{6/}	T _{p2} ^{7/}	EIUA ₂ ^{8/}
Cultivares	52,07 ^{ns}	0,0044 ^{ns}	1,421 ^{ns}	239,02*	423,62**	0,0064**	32,96**	31.042**
CE _a	571,69**	0,0624**	30,68**	638,19**	2.643,1**	0,0780**	70,47**	58.229**
Cultivares x CE _a	38,16 ^{ns}	0,0034 ^{ns}	1,854 ^{ns}	100,65 ^{ns}	76,43 ^{ns}	0,0026 ^{ns}	4,62**	13.057 ^{ns}
Resíduo	30,8	0,0027	1,374	94,2	44,92	0,0014	1,64	7.861
CV (%)	24,7	26,3	19,2	8,4	34,2	36,0	38,9	50,7

^{1/} taxa de fotossíntese – 1ª leitura, ^{2/} condutância estomática – 1ª leitura, ^{3/} transpiração – 1ª leitura, ^{4/} eficiência intrínseca do uso da água – 1ª leitura, ^{5/} taxa de fotossíntese – 2ª leitura, ^{6/} condutância estomática – 2ª leitura, ^{7/} transpiração – 2ª leitura, ^{8/} eficiência intrínseca do uso da água – 2ª leitura. ** p<0,01, *p<0,05 e ^{ns} não significativo

APÊNDICE C – Análise de variância (ANOVA) entre cultivares de sorgo sacarino, níveis de condutividade elétrica (CE_a) das soluções salinas e interação cultivares x CE_a para teor de solutos orgânicos, Na^+ e Cl^-

Fonte de Variação	Quadrado Médio					
	AST ^{1/}	AR ^{2/}	AA ^{3/}	Pt ^{4/}	[Na ⁺] ^{5/}	[Cl ⁻] ^{6/}
Cultivares	364,3 ^{ns}	35,93 ^{ns}	14,40 ^{**}	329,5 ^{**}	60,46 ^{**}	463,75 ^{**}
CE_a	1.511,9 ^{**}	196,09 ^{**}	23,20 ^{**}	391,4 ^{**}	687,39 ^{**}	13.909 ^{**}
Cultivares x CE_a	375,7 ^{ns}	25,06 ^{ns}	1,78 ^{ns}	49,96 ^{ns}	59,50 ^{**}	213,48 ^{**}
Resíduo	285,9	16,1	3,44	60,57	5,44	27,15
CV (%)	32,7	36,5	60,9	39,1	81,1	20,2

^{1/}açúcares solúveis totais, ^{2/}açúcares redutores, ^{3/}aminoácidos livres, ^{4/}proteínas solúveis, ^{5/}teor de sódio e ^{6/}teor de cloro nas folhas. ** p<0,01, *p<0,05 e ^{ns}não significativo

APÊNDICE D – Análise de variância (ANOVA) entre cultivares de sorgo sacarino, níveis de condutividade elétrica (CE_a) das soluções salinas e interação cultivares x CE_a para teor de macronutrientes nas folhas

Fonte de Variação	Quadrado Médio					
	[N] ^{1/}	[P] ^{2/}	[K] ^{3/}	[Ca] ^{4/}	[Mg] ^{5/}	[S] ^{6/}
Cultivares	74,80 ^{**}	0,853 ^{**}	0,524 ^{**}	0,401 ^{**}	0,345 ^{**}	1,91 ^{**}
CE_a	255,80 ^{**}	0,998 ^{**}	7,81 ^{**}	2,08 ^{**}	0,185 ^{**}	6,41 ^{**}
Cultivares x CE_a	4,70 ^{ns}	0,063 ^{ns}	0,072 ^{ns}	0,057 ^{**}	0,017 ^{**}	1,07 ^{**}
Resíduo	4,04	0,0617	0,078	0,014	0,0033	0,426
CV (%)	20,8	17,1	17,5	9,4	12,4	45,5

Teores de ^{1/}Nitrogênio, ^{2/}Fósforo, ^{3/}Potássio, ^{4/}Cálcio, ^{5/}Magnésio, ^{6/}Enxofre. ** p<0,01 e ^{ns}não significativo

APÊNDICE E – Análise de variância (ANOVA) entre cultivares de sorgo sacarino, níveis de condutividade elétrica (CE_a) das soluções salinas e interação cultivares x CE_a para teor de micronutrientes nas folhas

Fonte de Variação	Quadrado Médio			
	[Mn] ^{1/}	[Zn] ^{2/}	[Fe] ^{3/}	[Cu] ^{4/}
Cultivares	103.842**	1.446**	12.003*	47,69**
CE _a	82.222**	5.262**	67.951**	135,28**
Cultivares x CE _a	6.274**	439,3**	13.710**	12,17**
Resíduo	2.699	82,38	5.375	3,80
CV (%)	25,7	28,3	30,7	18,7

^{1/}Manganês, ^{2/}Zinco, ^{3/}Ferro, ^{4/}Cobre.** p<0,01 e *p<0,05

APÊNDICE F – Correlação entre conteúdo de nutrientes e Na em folhas de cultivares de sorgo sacarino

	N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Cl	Fe	Mn	Zn	Cu
N	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	<u>0,48*</u>	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	<u>0,87</u>	<u>0,41</u>	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	<u>0,90</u>	<u>0,60</u>	<u>0,91</u>	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	<u>0,78</u>	<u>0,60</u>	<u>0,70</u>	<u>0,76</u>	1,00	-	-	-	-	-	-	-
S	<u>0,82</u>	<u>0,51</u>	<u>0,78</u>	<u>0,81</u>	<u>0,63</u>	1,00	-	-	-	-	-	-
Na	<u>0,43</u>	-0,32	<u>0,58</u>	<u>0,43</u>	0,15	<u>0,39</u>	1,00	-	-	-	-	-
Cl	<u>0,71</u>	-0,12	<u>0,77</u>	<u>0,65</u>	<u>0,46</u>	<u>0,59</u>	<u>0,89</u>	1,00	-	-	-	-
Fe	<u>0,58</u>	<u>0,42</u>	<u>0,65</u>	<u>0,69</u>	<u>0,51</u>	<u>0,45</u>	<u>0,36</u>	<u>0,46</u>	1,00	-	-	-
Mn	<u>0,83</u>	<u>0,48</u>	<u>0,75</u>	<u>0,79</u>	<u>0,90</u>	<u>0,71</u>	0,29	<u>0,59</u>	<u>0,38</u>	1,00	-	-
Zn	<u>0,86</u>	0,31	<u>0,74</u>	<u>0,75</u>	<u>0,81</u>	<u>0,74</u>	<u>0,50</u>	<u>0,74</u>	<u>0,48</u>	<u>0,87</u>	1,00	-
Cu	<u>0,49</u>	<u>0,90</u>	<u>0,47</u>	<u>0,61</u>	<u>0,53</u>	<u>0,60</u>	-0,19	-0,04	0,36	<u>0,47</u>	0,28	1,00

*sublinhado quando significativo (p<0,05)

APÊNDICE G – Correlação entre conteúdo de nutrientes e Na em colmos de cultivares de sorgo sacarino

	N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Cl	Mn	Zn	Cu
N	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	-0,14	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	<u>0,76*</u>	0,25	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	<u>0,85</u>	0,36	<u>0,87</u>	1,00	-	-	-	-	-	-	-
Mg	<u>0,93</u>	0,05	<u>0,93</u>	<u>0,92</u>	1,00	-	-	-	-	-	-
S	<u>0,65</u>	-0,33	<u>0,43</u>	<u>0,46</u>	<u>0,57</u>	1,00	-	-	-	-	-
Na	<u>0,96</u>	-0,30	<u>0,69</u>	<u>0,76</u>	<u>0,87</u>	<u>0,69</u>	1,00	-	-	-	-
Cl	<u>0,65</u>	<u>0,47</u>	<u>0,93</u>	<u>0,88</u>	<u>0,85</u>	0,31	<u>0,53</u>	1,00	-	-	-
Mn	<u>0,94</u>	-0,07	<u>0,90</u>	<u>0,86</u>	<u>0,97</u>	<u>0,62</u>	<u>0,92</u>	<u>0,79</u>	1,00	-	-
Zn	<u>0,98</u>	-0,23	<u>0,80</u>	<u>0,80</u>	<u>0,93</u>	<u>0,68</u>	<u>0,98</u>	<u>0,65</u>	<u>0,97</u>	1,00	-
Cu	<u>0,90</u>	0,19	<u>0,94</u>	<u>0,95</u>	<u>0,98</u>	<u>0,53</u>	<u>0,81</u>	<u>0,90</u>	<u>0,95</u>	<u>0,89</u>	1,00

*sublinhado quando significativo ($p < 0,05$)

APÊNDICE H – Correlação entre conteúdo de nutrientes e Na em raízes de cultivares de sorgo sacarino

	N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Cl	Mn	Zn	Cu
N	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	<u>0,62*</u>	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	<u>0,48</u>	<u>0,60</u>	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	<u>0,67</u>	<u>0,85</u>	0,29	1,00	-	-	-	-	-	-	-
Mg	<u>0,60</u>	<u>0,87</u>	0,28	<u>0,96</u>	1,00	-	-	-	-	-	-
S	<u>0,49</u>	<u>0,76</u>	0,17	<u>0,77</u>	<u>0,80</u>	1,00	-	-	-	-	-
Na	<u>0,49</u>	<u>0,74</u>	0,04	<u>0,83</u>	<u>0,91</u>	<u>0,82</u>	1,00	-	-	-	-
Cl	<u>0,57</u>	<u>0,85</u>	<u>0,85</u>	<u>0,63</u>	<u>0,57</u>	<u>0,52</u>	0,35	1,00	-	-	-
Mn	<u>0,66</u>	<u>0,86</u>	<u>0,43</u>	<u>0,89</u>	<u>0,92</u>	<u>0,86</u>	<u>0,84</u>	<u>0,69</u>	1,00	-	-
Zn	<u>0,49</u>	<u>0,75</u>	0,12	<u>0,80</u>	<u>0,90</u>	<u>0,82</u>	<u>0,99</u>	<u>0,38</u>	<u>0,85</u>	1,00	-
Cu	<u>0,62</u>	<u>0,83</u>	<u>0,82</u>	<u>0,64</u>	<u>0,62</u>	<u>0,49</u>	<u>0,38</u>	<u>0,90</u>	<u>0,67</u>	<u>0,42</u>	1,00

*sublinhado quando significativo ($p < 0,05$)

APÊNDICE I – Autovalores, variância e correlação dos elementos com as duas componentes principais (CP1 e CP2) em folhas, colmos e raízes de cultivares de sorgo sacarino submetidas a diferentes níveis de salinidade

	Folhas		Colmos		Raízes	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
λ^*	7,51	2,35	8,33	1,04	7,69	2,01
variância (%)	62,61	19,62	83,27	10,42	69,94	18,28
variância acumulada (%)	62,61	82,23	83,27	93,70	69,94	88,22
N	-0,95**	-0,03	-0,95	-0,21	-0,72	0,19
P	-0,55	0,80	--	--	-0,95	0,14
K	-0,93	-0,14	-0,91	0,28	-0,51	0,81
Ca	-0,95	0,07	-0,93	0,29	-0,93	-0,17
Mg	-0,85	0,21	-0,99	0,04	-0,94	-0,25
S	-0,86	0,06	-0,64	-0,49	-0,84	-0,31
Na	-0,48	-0,80	-0,90	-0,37	-0,84	-0,52
Cl	-0,73	-0,67	-0,83	0,50	-0,78	0,57
Fe	-0,67	0,00	--	--	--	--
Mn	-0,88	0,06	-0,99	-0,08	-0,96	-0,10
Zn	-0,88	-0,19	-0,95	-0,27	-0,85	-0,46
Cu	-0,57	0,72	-0,98	0,17	-0,79	0,54

*autovalores de cada CP; **correlação entre cada elemento e a CP.