

ANÍZIO HONORATO GODOI NETO

**CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS DE DIFERENTES
NÍVEIS DE SALINIDADE E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO:
RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS**

RECIFE-PE

2018

ANÍZIO HONORATO GODOI NETO

**CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS DE DIFERENTES
NÍVEIS DE SALINIDADE E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO:
RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS**

Dissertação de mestrado apresentada pelo
Mestrando Anízio Honorato Godoi Neto ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola da Universidade Federal Rural de
Pernambuco para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Ênio Farias de França e Silva

Co-orientador: Luís Fernando de Souza Magno Campeche

**RECIFE-PE
2018**

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

G588c Godoi Neto, Anízio Honorato.
Cana-de-açúcar irrigada com águas de diferentes níveis de salinidade e lâminas de lixiviação: respostas fisiológicas e bioquímicas / Anízio Honorato Godoi Neto. – Recife, 2018.
131 f.: il.

Orientador(a): Ênio Farias de França e Silva.
Coorientador(a): Luís Fernando de Souza Magno Campeche.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2018.
Inclui referências.

1. Estresse abiótico 2. Fotossintética - Eficiência 3. Fração de lixiviação
4. Saccharum officinarum 5. Salinidade 6. Potencial hídrico 7. Água – Uso
8. RB 92579 9. Fotossíntese 10. Estresse oxidativo 11. Manejo de sais I. Silva, Ênio Farias de França e, orient. II. Campeche, Luís Fernando de Souza Magno, coorient. III. Título

CDD 630

**CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS DE DIFERENTES NÍVEIS DE
SALINIDADE E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO: RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E
BIOQUÍMICAS**

ANÍZIO HONORATO GODOI NETO

Dissertação defendida e aprovada em 27 de Julho pela banca examinadora:

Orientador:

Ênio Farias de França e Silva, Prof. Dr.
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI)

Examinadores:

Claudivan Feitosa de Lacerda, Prof. Dr.
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Departamento de Engenharia Agrícola (DENA)

Edivan Rodrigues de Souza, Prof. Dr.
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
Departamento de Agronomia (DEPA)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado forças para vencer as dificuldades ao longo desta jornada, nos momentos que achei estar mais fraco estava realmente mais forte que nunca! A todas as dificuldades que apareceram ao longo do caminho pois sem elas não teria vencido as barreiras e com certeza não teria evoluído pessoalmente e profissionalmente.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, minha gratidão pelas contribuições em minha formação profissional.

À FACEPE pela bolsa de estudos concedida, a CAPES e o CNPq pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa.

Ao meu saudoso avô Anizio Honorato Godoy (*In memoriam*) que sempre teve a realização de me ver crescendo profissionalmente e sempre foi meu grande exemplo e incentivador.

Aos meus pais Carlos Godoy e Ana Paula que dedicaram as suas vidas para a minha educação e dos meus irmãos sem vocês com certeza não estaria aqui hoje.

Aos meus irmãos Carlos e Paulo Godoy por sempre estarem ao meu lado em todas as situações.

Aos meus avôs Manoel Alves e Maria por todo o carinho, apoio e constante incentivo.

As minhas Tias Jaqueline Alves e Manuela Alves por todo carinho e dedicação.

À Flávia Guerra por todo o carinho e incentivo.

Ao meu orientador Professor Dr. Ênio Farias por toda dedicação e paciência ao longo deste trabalho e ser para mim um exemplo de pessoa e profissional.

Ao meu grande amigo José Edson Moraes por toda ajuda ao longo desta jornada, sendo uma grande satisfação para mim ter tido a oportunidade de trabalhar com ele e sem dúvida um grande aprendizado a grande lição que consigo tirar com toda essa experiência é que sobe-se um degrau no conhecimento e dois degraus na humildade, sendo um exemplo para mim de pessoa e profissional. O seu amor pelo que faz contagia todos que estão trabalhando e faz as coisas se tornarem mais simples e motiva a sempre buscar algo a mais.

A equipe de trabalho Weliston Cutrim, Antônio Diomescio e Larissa Lino por toda a dedicação e parceria ao longo da jornada, sem vocês não seria possível realizar todas as atividades e com certeza não teria a mesma qualidade. Ainda agradeço a amizade e todo o incentivo para sempre fazermos o melhor possível.

A Professora Lilia Willadino por toda as contribuições para este trabalho e por disponibilizar o seu laboratório para a realização das análises.

A Raquele Lira por toda a transferência de conhecimento e colaboração neste trabalho.

Ao técnico do Laboratório LCTV Francisco Wellington por toda a disponibilidade para auxiliar na realização das análises!

A Ronaldo Alves pelas considerações para este trabalho, leituras com o IRGA e parceria.

Aos amigos da sala de estudo número três Valentim Ruben, Adiel Cruz, Andrey Thyago, Fred Ribeiro, Dayane Lima, Fernanda Andrade, Leandro Gordin, Sirleide Menezes e Fernando José por todos os momentos de descontração e pela grande amizade tornando o caminho mais leve!

Ao grande parceiro Carlos Donato pelas boas conversas, constante incentivo e principalmente amizade.

Ao faixa preta Hammady Ramalho por toda ajuda nas análises, pelo aprendizado transmitido para mim e seu constante incentivo.

Ao meu amigo Tássio Maurício que mesmo longe nunca deixou de se fazer presente me apoiando em todos os momentos.

Ao Professor Dr. Antônio Ricardo por todos os conselhos, por mesmo distante estar sempre presente e principalmente por toda atenção e sua amizade.

À todos que contribuíram de forma direta e indireta meu muito obrigado!

“Eu faço da dificuldade a minha motivação. A volta por cima vem na continuação.”

Charlie Brown Jr.

“Ama-se mais o que se conquista com esforço”

Benjamin Disraeli

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”

Desconhecido

BIOGRAFIA

ANIZIO HONORATO GODOI NETO, nascido em 27 de janeiro de 1991, João Pessoa-PB, filho de Carlos Alberto Souto Godoy e Ana Paula de Andrade Lima Alves Godoi. É Engenheiro agrônomo formado pela Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, campus Unidade acadêmica de Garanhuns-UAG (2010-2015), onde realizou atividades de pesquisas sendo PIBIC/FACEPE, avaliando as mudanças climáticas no Agreste de Pernambuco. Após formado trabalhou no desenvolvimento e instalação de projetos de irrigação. Em agosto de 2016 ingressou no mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFRPE, onde foi finalizado em julho de 2018.

RESUMO GERAL

Objetivou-se avaliar o efeito da salinidade da água de irrigação e frações de lixiviação no cultivo da cana-de-açúcar, averiguando aspectos fisiológicos e bioquímicos das plantas. O experimento foi conduzido no Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Recife. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial 5 x 2, com 4 repetições. Utilizou-se cinco níveis de salinidade da água de irrigação com duas frações de lixiviação (0 e 0,17) correspondendo a 100% e 120% da evapotranspiração da cultura. Os níveis de salinidade utilizados foram: 0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dS m⁻¹, sendo estes atingidos através da adição de NaCl e CaCl₂ a água de abastecimento local (0,5 dS m⁻¹). Utilizou-se a variedade de cana-de-açúcar RB 92579, cultivada em lisímetros de drenagem. Aos 60 dias após o plantio (DAP) iniciou-se a aplicação dos tratamentos através de irrigação por gotejamento. As respostas fisiológicas das plantas aos foram realizadas, aos 90, 150 e 210 DAS com o Analisador de Gás Infravermelho (IRGA LI-6400), em que foram determinadas as seguintes variáveis: fotossíntese (A), a condutância estomática (g_{sw}), transpiração (E), CO₂ intercelular (C_i), temperatura foliar (T_{Leaf}), eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência intrínseca do uso da água (A/g_{sw}), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) e relação da concentração intercelular de CO₂ no mesófilo e concentração externa de CO₂ (C_i/C_a), em uma folha +3 de uma planta por tratamento. Foi coletada uma folha +3, para análises da atividade enzimática da catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), as coletas foram realizadas aos 90, 150, 210 e 270 dias após o plantio, neste mesmo intervalo foi realizado antes do nascer do sol o potencial hídrico com o auxílio de uma câmara de Scholander, utilizando uma folha +3. O potencial hídrico apresentou redução quadrática à medida que se elevou os níveis salinos, já o comportamento enzimático teve um incremento à medida que se intensificou o acúmulo de sais nos lisímetros até 6,98 dS m⁻¹ para a CAT e de 7,27 dS m⁻¹ para APX. Para as trocas gasosas (A , E , g_{sw} e C_i) apresentaram uma redução linear à medida que se incrementou os níveis salinos, já a temperatura apresentou um incremento de 2 °C. Os pigmentos fotossintéticos (clorofila a , b e carotenóides) apresentaram uma redução em sua quantidade à medida que se incrementou os níveis de salinidade, demonstrando que o estresse salino interfere na síntese e degradação dos pigmentos. A fração de lixiviação apresentou melhor eficiência quando comparada com a 100% ETc, promovendo maior incremento nas variáveis analisadas.

GENERAL ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of irrigation water salinity and leaching fractions on sugarcane cultivation, investigating the physiological and biochemical aspects of the plants. The experiment was conducted at the Department of Agricultural Engineering (DEAGRI), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Campus Recife. A completely randomized design was used in a 5 x 2 factorial arrangement, with 4 replications. Five irrigation water salinity levels were used with two leaching fractions (0 and 0.17) corresponding to 100% and 120% of crop evapotranspiration. The salinity levels used were: 0.5; 2.0; 4.0; 6.0 and 8.0 dS m⁻¹, being reached by addition of NaCl and CaCl₂ to the local supply water (0.5 dS m⁻¹). The sugarcane variety RB 92579, cultivated in drainage lysimeters, was used. At 60 days after planting (DAP) the application of the treatments through drip irrigation was started. The physiological responses of the plants were performed at 90, 150 and 210 DAS with the infrared gas analyzer (IRGA LI-6400), in which the following variables were determined: photosynthesis (A), stomatal conductance (g_{sw}), transpiration (E), intercellular CO₂ (C_i), foliar temperature (T_{Leaf}), instantaneous water use efficiency (A / E), intrinsic water use efficiency (A / g_{sw}), instantaneous carboxylation efficiency ratio of intercellular CO₂ concentration in the mesophyll and external CO₂ concentration (C_i / C_a), in a +3 leaf of a plant per treatment. A +3 leaf was collected for analyzes of the enzymatic activity of catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX). The samples were collected at 90, 150, 210 and 270 days after planting. For the water potential with the aid of a Scholander chamber using a +3 sheet. The water potential presented a quadratic reduction as the salt levels increased, and the enzymatic behavior increased as the accumulation of salts in lysimeters increased to 6.98 dS m⁻¹ for CAT and 7.27 dS m⁻¹ for APX. For the gas exchanges (A, E, g_{sw} and C_i) presented a linear reduction as the salt levels increased, already the temperature showed an increase of 2 ° C. The photosynthetic pigments (chlorophyll a, b and carotenoids) showed a reduction in their quantity as salt levels increased, demonstrating that saline stress interferes with the synthesis and degradation of the pigments. The leaching fraction presented better efficiency when compared to 100% ETC, promoting a greater increase in the analyzed variables.

Sumário

CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA	17
1. INTRODUÇÃO	17
2. Objetivos	18
3. Hipótese Geral	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 A Cultura da cana-de-açúcar	19
4.2 Aspectos morfológicos e Fotossíntese da Cana-de-açúcar	20
4.2.1 Transpiração e Condutância Estomática	22
4.2.2 Teor relativo de água na folha e Potencial de Água na folha	23
5. Estresses abióticos	23
5.1 Estresse Salino	24
5.2 Estresse oxidativo	27
6. Mecanismos de defesa ao estresse	29
6.1 Ajustes osmótico	29
6.2 Enzimas	30
6.3 Clorofila <i>a</i> e <i>b</i>	31
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
CAPÍTULO 2 – TROCAS GASOSAS EM PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A ESTRESSE SALINO E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO	43
1. INTRODUÇÃO	45
2. MATERIAL E MÉTODOS	46
2.1 Local do estudo	46
2.2 Caracterização das unidades experimentais	47
2.3 Características do solo	48
2.4 Adubação Mineral	48
2.5 Plantio e condução da cultura	49
2.6 Delineamento experimental e tratamentos	50
2.7 Características do sistema de irrigação	51
2.8 Variáveis fisiológicas	52
2.9 Variáveis meteorológicas	53
2.10 Análise estatística	54
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.1 Trocas gasosas e Fotossíntese	54
3.1.1 Fotossíntese (<i>A</i>)	56
3.1.2 Condutância estomática (g_{sw})	59
3.1.3 Transpiração (<i>E</i>)	62
3.1.4 Concentração interna de CO ₂ (<i>C_i</i>)	65
3.1.5 Temperatura foliar (T_{Leaf})	67
4. CONCLUSÕES	70
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
CAPÍTULO 3 – RELAÇÕES HÍDRICAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SOB ESTRESSE SALINO E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO	79
1. INTRODUÇÃO	81
2. MATERIAL E MÉTODOS	82
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
3.1 Eficiência instantânea do uso da água (<i>A/E</i>)	88
3.3 Eficiência intrínseca do uso da água (<i>A/g_{sw}</i>)	90
3.4 Eficiência instantânea de carboxilação (<i>A/C_i</i>)	91

3.5 Relação C_i/C_a	91
3.6 Potencial hídrico foliar (ψ_w).....	93
4. CONCLUSÕES	96
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
CAPÍTULO 4 – PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E INDICADORES	
BIOQUÍMICOS COMO DESCRITORES DO ESTRESSE SALINO PARA A	
CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	
	103
1. INTRODUÇÃO	105
2. MATERIAL E MÉTODOS	106
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	109
3.1 Clorofila <i>a</i>	110
3.2 Clorofila <i>b</i>	113
3.3 Carotenóides.....	114
3.4 Catalase (CAT).....	116
3.5 Ascorbato peroxidase (APX)	119
4. CONCLUSÕES	121
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
CONSIDERAÇÕES FINAIS	129

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 REVISÃO DE LITERATURA	17
Figura 1 Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Fonte: GASCHO & SHIH, (1983).....	20
Figura 2 Estresses abióticos em plantas (MARTINEZ, 2004).....	24
CAPÍTULO 2 TROCAS GASOSAS EM PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A ESTRESSE SALINO E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO	
Figura 1 Vista geral dos lisímetros de drenagem (A); Estação meteorológica (B); Vista externa e interna da casa de coleta e medição do material drenado (C, D). Fonte: Elaborado pelo autor.....	47
Figura 2 Adubação de fundação: adubos utilizados (A); aplicação no sulco (B); vista do sulco após a aplicação (C) e adubação de cobertura (D). Fonte: Elaborado pelo autor.....	49
Figura 3 Etapas para o plantio dos rebolos; Abertura dos sucos de plantio (A); Aplicação do Regente e da adubação (B); Deposição dos rebolos no sulcos (C) e Vista da deposição dos rebolos no sulco (D). Fonte: Elaborado pelo autor.....	50
Figura 4 Analisador de fotossíntese modelo LI-6400 (Licor, Lincoln NE, USA) (A), monitoramento das trocas gasosas em campo (B), (C) e (D). Fonte: Elaborado pelo autor.....	53
Figura 5 Variáveis meteorológicas ao longo de um ano de cultivo da cana-de-açúcar RB 92579.....	54
Figura 6 Fotossíntese da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.....	56
Figura 7 Fotossíntese da cana-de-açúcar (RB92579) submetida a lâminas de irrigação (Com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A) e 210 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.....	58
Figura 8 Condutância estomática da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C) *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.....	60
Figura 9 Condutância estomática da cana-de-açúcar (RB92579) submetida a lâminas de irrigação (Com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE., aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C)*, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.....	61
Figura 10 Transpiração (E) da cana-de-açúcar (RB92579) submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e	

	210 DAS (C) *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.....	63
Figura 11	Transpiração da cana-de-açúcar (RB92579) submetida a lâminas de irrigação (Com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.....	64
Figura 12	Concentração interna de CO ₂ (C _i) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.....	66
Figura 13	Concentração interna de CO ₂ (C _i) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a lâminas de irrigação (Com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 210 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.....	67
Figura 14	Temperatura foliar (T _{Leaf}) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.....	68
Figura 15	Temperatura foliar (T _{Leaf}) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a lâminas de irrigação (Com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.....	70
	CAPÍTULO 3 RELAÇÕES HÍDRICAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SOB ESTRESSE SALINO E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO.....	79
Figura 1	Determinação do potencial hídrico: Coleta de Folhas em campo(A); Corte em bisel (B); Detalhe do corte em bisel (C) e visualização de gotas na superfície do corte (D).....	85
Figura 2	Evapotranspiração de referência e lâminas de irrigação (100 e 120%) ao longo do ciclo de cultivo.....	86
Figura 3	Eficiência instantânea do uso da água (A/E) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A) e 210 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.....	89
Figura 4	Eficiência instantânea do uso da água (A/E) na cana-de-açúcar (RB 92579) submetida a lâminas de irrigação (Com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.....	89
Figura 5	Eficiência intrínseca do uso da água (A/g _{s,w}) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação (A) e a lâminas de irrigação (Com e sem fração de	

	lixiviação) (B) aos 90 DAS em Recife, PE. *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.....	90
Figura 6	Eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS. *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.....	91
Figura 7	Relação C_i/C_a da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A) e 210 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.....	92
Figura 8	Relação C_i/C_a na cana-de-açúcar (RB92579), submetida a lâminas de irrigação (Com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A) e 210 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.....	93
Figura 9	Potencial hídrico foliar da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE.....	94
CAPÍTULO 4	PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E INDICADORES BIOQUÍMICOS COMO DESCRITORES DO ESTRESSE SALINO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	103
Figura 1	Coleta de folhas em campo: corte da folha (A), identificação do papel alumínio (B), imersão em nitrogênio líquido (C) e armazenamento em isopor (D). Fonte: Elaborado pelo autor.....	108
Figura 2	Teor de clorofila <i>a</i> da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A), 210 DAS (B) e 270 DAS (C).....	111
Figura 3	Teor de clorofila <i>b</i> da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A), 210 DAS (B) e 270 DAS (C).....	113
Figura 4	Teor de Carotenóides da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE. 150 DAS (salinidade, A), 150 DAS (lâminas, B), 210 DAS (C); 270 DAS (D).....	115
Figura 5	Catalase da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A), 210 DAS (B) e 270 DAS (C).....	117
Figura 6	Catalase da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A) e 210 DAS (B).....	119
Figura 7	Ascorbato Peroxidase na cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A), 210 DAS (B) e 270 DAS (C).....	120

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2	TROCAS GASOSAS EM PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A ESTRESSE SALINO E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO.....	43
Tabela 1	Atributos físico-químicos do solo dos lisímetros de drenagem (0-40 cm).....	48
Tabela 2	Resumo da análise de variância das variáveis fotossíntese (A), condutância estomática (g_{sw}), CO_2 intracelular (C_i) e Temperatura Foliar (T_{Leaf}) na cana-de-açúcar RB 92579 (Cana planta) irrigada com diferentes níveis de salinidade e lâminas de lixiviação em Recife, PE.....	55
CAPÍTULO 3	RELAÇÕES HÍDRICAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SOB ESTRESSE SALINO E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO.....	79
Tabela 1	Características físico-químicas do solo dos lisímetros de drenagem, Espodossolo (0-40 cm), Município de Goiana, PE.....	83
Tabela 2	Resumo da análise de variância das variáveis Transpiração (E), eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência intrínseca do uso da água (A/g_{sw}), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i), relação da concentração intercelular de CO_2 no mesófilo, concentração de CO_2 externa atual (C_i/C_a) e potencial hídrico foliar (ψ_w) na cana-de-açúcar RB 92579 (Cana planta) irrigada com diferentes níveis de salinidade e lâminas de lixiviação em Recife, PE.....	87
CAPÍTULO 4	PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E INDICADORES BIOQUÍMICOS COMO DESCRITORES DO ESTRESSE SALINO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	103
Tabela 1	Resumo da análise de variância dos pigmentos fotossintéticos (clorofila a , clorofila b , carotenóides), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), na cana-de-açúcar RB 92579 (Cana planta) irrigada com diferentes níveis de salinidade e lâminas de lixiviação em Recife, PE	110

CAPÍTULO 1

REVISÃO DE LITERATURA

CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar, destaca-se pela importância e grande influência no agronegócio brasileiro pois, além da produção de larga escala de etanol e açúcar, vem sendo conhecida e utilizada como uma cultura que causa menor impacto ambiental pela substituição dos combustíveis fósseis e pelo aproveitamento de seus resíduos, como a vinhaça, torta de filtro e bagaço. O Brasil é o um dos produtores mundial de cana-de-açúcar, sendo São Paulo que lidera esta produção. A utilização da cultura é crescente ao longo dos anos, conduzindo a expansão da sua produção em ambientes que não são propícios ao seu cultivo e a preocupação em se estudar e mitigar/amenizar os efeitos causados. Entre estes ambientes, salientam-se aqueles que causam estresses abióticos nas plantas, como o estresse por temperatura, o estresse hídrico e o estresse salino (CHICONATO, 2016).

O estresse salino é importante estresse abiótico que causa diminuição de produção e rendimento das culturas (PATADE et al., 2011). A salinidade pode causar deficiência hídrica por diminuir o potencial de água no solo e pela absorção de íons tóxicos, como o Na^+ . As plantas apresentam tolerância ao sal quando respondem fisiologicamente de forma a minimizar seus efeitos. Neste sentido, há alguns compostos chamados osmólitos compatíveis ou osmoprotetores, que atuam no ajuste osmótico das células.

Entre estes, pode-se citar o aminoácido prolina, a amina quaternária glicina betaína e o dissacarídeo sacarose, importantes osmólitos compatíveis encontrados nas plantas. Estas substâncias, quando em grandes quantidades dentro da planta, não alteram negativamente seu metabolismo e se acumulam de forma a ajustar a quantidade de água na célula, evitando perdas excessivas pelo controle do potencial osmótico (SZABADOS et al., 2011).

Além desta função principal no combate ao estresse, estes osmólitos também apresentam duas funções de proteção à membrana plasmática, como antioxidantes e na manutenção das quantidades de carbono e nitrogênio em plantas que estão se recuperando do estresse (GUPTA & HUANG, 2014).

A planta desencadeia outras reações pelo estresse salino na tentativa de diminuir os danos causados e, nesta fase, pode haver diminuição ou aumento da atividade de algumas enzimas, tanto as fundamentais ao metabolismo, quanto os antioxidantes, quando o estresse intensifica a produção de radicais livres. E, neste estágio, pode estar ocorrendo uma série de reações, como a peroxidação lipídica e o extravasamento de

eletrólitos. O estresse salino reflete diretamente no processo fotossintético, com consequentes perdas de crescimento e produtividade (MUNNS, 2011).

Sob condições de estresse as variáveis das trocas gasosas podem apresentar alterações, tanto por limitações difusivas, restringindo a disponibilidade de dióxido de carbono para a assimilação, como por limitações metabólicas, pelo aumento do efeito fotoinibitório (GLAZ et. al., 2004).

Por todas estas modificações celulares que ocorrem nas plantas sob estresse é de grande importância o estudo da fisiologia do metabolismo vegetal, de modo a entender como o estresse ocorre e quais suas consequências, uma vez que cada espécie pode responder de forma distinta.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da salinidade da água de irrigação e frações de lixiviação no cultivo da cana-de-açúcar, averiguando aspectos fisiológicos e bioquímicos das plantas cultivadas em lisímetro de drenagem.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar as respostas da cana-de-açúcar sob salinidade e frações de lixiviação, através da análise das trocas gasosas e do estado hídrico das folhas;
- Avaliar o comportamento e a atividade das enzimas do sistema antioxidativo em função do estresse salino da cana-de-açúcar.
- Avaliar o nível de tolerância da cultura à diferentes níveis de salinidade de água de irrigação.
- Avaliar o comportamento dos pigmentos fotossintéticos (clorofila *a* e *b* e carotenóides) em função do estresse salino da cana-de-açúcar.

3. Hipótese Geral

A salinidade da água de irrigação e frações de lixiviação na cultura da cana-de-açúcar proporcionam efeitos nos aspectos fisiológicos: fotossíntese (*A*), transpiração (*E*), condutância estomática (g_{sw}), temperatura foliar (T_{Leaf}) e concentração interna de CO₂ (*C_i*).

3.1 Hipóteses específicas

- A cana-de-açúcar sob salinidade possui diferentes respostas em relação às trocas gasosas e estado hídrico da folha.
- A salinidade ocasiona efeito na concentração das enzimas (catalase e ascorbato peroxidase) do sistema antioxidativo da planta de cana-de-açúcar.
- A salinidade ocasiona efeito na concentração dos pigmentos fotossintéticos (clorofila *a* e *b* e carotenóides).
- O uso da fração de lixiviação promoverá uma redução do efeito da salinidade, aumentando as trocas gasosas (A , E , g_{sw} e Ci), e o estado hídrico da folha (potencial hídrico). Uma redução do estresse oxidativo, apresentando menor teor de enzimas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A Cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é proveniente do sudeste asiático, mais precisamente na região central da Nova Guiné e Indonésia, onde o clima característico é composto de temperaturas elevadas e alta umidade relativa do ar (MATSUOKA et al., 2005). Trata-se de uma planta de reprodução sexuada, porém quando cultivada comercialmente é multiplicada assexuadamente, por propagação vegetativa. É caracterizada pela inflorescência do tipo panícula, flor hermafrodita, caule em crescimento cilíndrico composto de nós e entre nós, folhas alternas, opostas, presas aos nós dos colmos, com lâminas desfilica em suas bordas, e bainha aberta (JADOSKI et al., 2011).

A cana-de-açúcar possui quatro estágios fenológicos: fase de brotação e fase de estabelecimento, perfilhamento, crescimento e maturação. A fase de brotação compreende o plantio até a compleição da brotação das gemas; logo após o plantio, se inicia o processo de intumescimento das gemas; cujas brotações surgem dentro de 20 a 30 dias após o plantio, dependendo da umidade do solo; a brotação é acompanhado pelo início do transporte ativo de substâncias para os pontos de crescimento; a fase de perfilhamento se inicia em torno de 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias; é um processo fisiológico de ramificação subterrânea contínuo das juntas nodais compactas. A fase decrescimento dos colmos começa a partir de 120 dias depois do

plantio e dura até 270 dias, em cultivo de 12 meses; esta é a fase mais importante do cultivo, pois é quando ocorrem a formação e o alongamento do colmo, resultando em produção. A fase de maturação em um cultivo de cana-planta se prolonga por seis meses, começando aos 270–360 dias após plantio. A síntese e o acúmulo rápido de açúcar ocorrem durante esta fase por isso, o crescimento vegetativo é reduzido (DIOLA & SANTOS, 2010). Na Figura 1, observa-se as fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar.

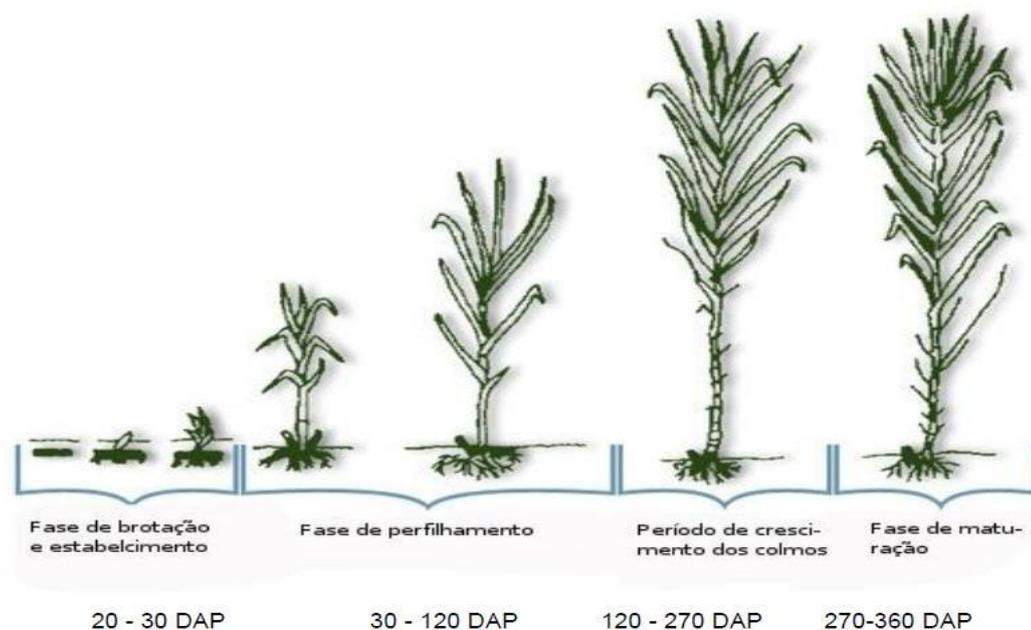


Figura 1. Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. **Fonte:** GASCHO & SHIH, (1983).

A cana-de-açúcar tem se destacado por ser uma importante fornecedora de matéria prima para produção de açúcar, álcool, açúcar mascavo e subprodutos como rapadura, melaço, aguardente, desde os tempos remotos pode ser utilizada como alimentação animal e mais recentemente a cultura é alvo na produção de bioenergia contribuindo de várias formas para a economia dos países produtores (FAO, 2009).

4.2 Aspectos morfológicos e Fotossíntese da Cana-de-açúcar

Morfologicamente as folhas da cana-de-açúcar podem ser divididas em: folha propriamente dita com uma nervura central de forma engrossada; bainha que envolve o colmo em pleno desenvolvimento, folhas jovens em plena expansão celular e uma junta articulada que fica entre a bainha e a folha chamada de colar (NELSON, 2011).

As folhas da cana-de-açúcar podem apresentar comprimento e largura extremamente variada, sendo essa uma característica relacionada com o fator genético das variedades, podendo esta alcançar seu máximo potencial, ou sofrer decréscimos dependendo das condições as quais está sendo submetida. Em termos médios, os comprimentos das folhas de cana-de-açúcar variam de 0,60 m a 1,5 m, e largura que variam de 2,5 cm a 10 cm (GODOY, 2007).

Devido a sua expansão foliar, número de folhas e metabolismos C4, a cultura da cana-de-açúcar é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em 100 mg de CO₂ fixado por dm⁻² de área foliar por hora, mas essa intensa atividade fotossintética, não se correlaciona diretamente com a elevada produtividade de biomassa, uma vez que as características das variedades e condições climáticas também são determinantes (RODRIGUES, 1995; TAIZ & ZEIGER, 2013; ROBERTO, 2015).

A fotossíntese trata-se de uma reação de oxido-redução entre o CO₂ (agente oxidante) e a H₂O (agente redutor) onde os elétrons são transferidos contra um gradiente eletroquímico (TAIZ & ZEIGER, 2013). A fotossíntese em planta C4 é um processo extremamente complexo que está presente em cerca de dezenove famílias de plantas vasculares tornando-se um dos mais convergentes fenômenos evolutivos já conhecido pelo homem (SAGE, 2004; MUHAIDAT et al., 2007; TAIZ & ZEIGER, 2013).

A fotossíntese na cultura da cana-de-açúcar teve seus primeiros registros por HATCH et al., 1967. Os pesquisadores observaram ainda que os ácidos de quatro carbonos, malato e aspartato eram os primeiros intermediários estáveis na fixação de CO₂, assim as plantas C4 apresentam estruturas especializadas anatomicamente e bioquimicamente que contribuem na concentração de CO₂ nos sítios da Rubisco (VOZNESENSKAYA et al., 2004).

Marchiori et al. (2014) ressaltam a variação da taxa de assimilação de CO₂ nos extratos superiores e inferiores de variedades de cana-de-açúcar. Os autores mencionam que as reduções podem ser de três a quatro vezes no extrato inferior quando comparado com o extrato superior do dossel da cultura.

A cana-de-açúcar tem uma grande capacidade de produzir matéria orgânica devido à alta taxa fotossintética por unidade de superfície de terreno, resultando em alto índice de área foliar (IAF). Além disto, o longo ciclo de crescimento da planta resulta em elevadas produções de matéria seca (RODRIGUES, 1995). As plantas do tipo C4 também apresentam características de maior eficiência na abertura e no fechamento dos estômatos, em condições de algum estresse (TAIZ & ZEIGER, 2013).

4.2.1 Transpiração e Condutância Estomática

A abertura estomática é diretamente responsável pelo fluxo de vapor d'água que sai na planta, quando é reduzida, o fluxo de vapor d'água diminui proporcionalmente e mais intensamente do que a diminuição do fluxo de absorção de CO₂. Em alguns casos os estômatos tendem a fechar completamente limitando o suprimento na planta, isso acontece quando as perdas por transpiração afetam irreversivelmente, o crescimento e consequentemente a sobrevivência da planta (PIMENTEL, 1998).

As plantas apresentam o mecanismo de condutância foliar pelo qual reduzem suas perdas de água e, na maioria das vezes indica, uma condição de deficiência hídrica. O fechamento estomático pode ocorrer dentro de uma larga faixa de potencial de água na folha, dependendo da espécie (JONES, 1992). Condutância é o inverso da resistência à difusão da folha e o gás pode ser considerado um índice de abertura dos estômatos. Sabendo a condutância foliar, a taxa de transpiração, a taxa líquida de assimilação de CO₂, o seu nível no ambiente e intercelular, podem ser calculados a eficiência da carboxilação, eficiência instantânea do uso da água e eficiência intrínseca do uso da água (LONG & WOOLHOUSE, 1978).

Diversos são os trabalhos que mostram a influência da deficiência hídrica nas trocas gasosas sobre as culturas, em especial sobre a cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER & SMITH, 2005; SMIT & SINGELS, 2006); desta forma, em condições de estresse hídrico as variáveis de trocas gasosas podem apresentar alterações de forma distinta, de acordo com a espécie, tanto por limitações difusivas, restringindo a disponibilidade de dióxido de carbono para assimilação, quanto por limitações metabólicas, pelo aumento do efeito foto inibitório (GONÇALVES et al., 2010).

A condutância estomática decai rapidamente sob queda rápida da umidade do solo, pois a abertura estomática responde mais rapidamente à variação do conteúdo de água no solo do que no potencial da água na folha (SASSAKI & MACHADO, 1999). O fechamento estomático pode ocorrer dentro de uma larga faixa de potencial de água na folha, dependendo da espécie (JONES, 1992).

Em plantas sem restrição hídrica, a condutância estomática pode aumentar com a diminuição do potencial da água na folha, resultante de uma maior taxa de transpiração à medida que a abertura estomática aumenta. Estudos realizados em condições controladas e em condições de campo, sugerem que o ácido abscísico (ABA) produzido na raiz pode desempenhar papel importante no controle da condutância

estomática e que a resposta dos estômatos ao ABA depende do estado hídrico da planta (SANTOS & CARLESSO, 1998; SASSAKI & MACHADO, 1999; INMAMBAMBER & SMITH, 2005).

4.2.2 Teor relativo de água na folha e Potencial de Água na folha

O teor relativo de água (TRA) na folha é definido como a quantidade de água de um tecido quando comparada com a máxima quantidade de água que ele poderá reter em um dado momento (CAIRO, 1995). O TRA é uma variação de massa de água do tecido, a qual, por sua vez, decorre da variação da massa de água da célula e, conseqüentemente, da variação do volume celular, entre a turgescência plena e a perda da turgescência (ANGELOCCI, 2002). O controle das funções fisiológicas está diretamente relacionado com o conteúdo hídrico da planta e alterações no TRA afetam diretamente todo o aparato fotossintético.

O potencial de água na folha (Ψ_w) começa a diminuir com o declínio da disponibilidade de água no solo, levando à perda da turgescência e induzindo também ao fechamento estomático, essas respostas diferenciam-se de espécie para espécie (MANSUR & BARBOSA, 2000; TAVARES, 2009).

Este é um indicador que descreve o estado energético foliar, cujos gradientes explicam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera, embora seja possível encontrar uma variação ao longo do dia, mesmo em plantas irrigadas, essa variável descreve o estado hídrico da planta e tem sido muito utilizado em estudos das relações hídricas dos vegetais. O valor do potencial de água na folha indica a diferença entre o estado energético da planta no sistema considerado e num estado de referência. No estado de referência, o potencial da água é considerado zero. Sendo o fechamento precoce de estômatos uma das primeiras respostas de tolerância à seca. O potencial da água na folha pode ser visto como uma medida de sensibilidade da cana-de-açúcar ao estado da água no solo, contudo a condução estomática diminui em resposta à seca do solo, sem alterações significativas no potencial hídrico (BERGONCI & PEREIRA, 2002; SMIT & SINGELS, 2006).

5. Estresses abióticos

O estresse em plantas nada mais é que um desvio significativo das condições ótimas para sua vida, induzindo mudanças e respostas em todos os níveis funcionais do

organismo, os quais são reversíveis a princípio, mas podem se tornar permanentes (LACHER, 2000).

Na natureza os estresses ambientais não atuam isoladamente sobre as plantas. Os efeitos são associados e decorrem em um grande número de respostas nos vegetais. Os estudos dos estresses, muitas vezes descritos na literatura destacam apenas o efeito do estresse isolado, isto é, estresse hídrico, salino, nutricional, poluentes, baixas e altas temperaturas, inundação e radiação. No Brasil dentre todos esses fatores já citados o mais estudado é o déficit hídrico, pois é o que mais afeta de maneira negativa o crescimento, metabolismo e produtividade da cana-de-açúcar. Assim, seus efeitos nas plantas incluem redução nas taxas de assimilação de CO₂, tamanho das células foliares, taxa de transpiração, potencial de água na planta, taxa decrescimento e abertura estomática (TERAMOTO, 2003; LAWLOR, 2013).

O estresse em plantas segue uma dinâmica que se resume na percepção do sinal na transmissão do sinal que vai induzir a mudanças metabólicas na planta assim expressando a resposta ao estresse, está que vai depender da intensidade e da susceptibilidade da cultura ao estresse (PRISCO et al, 2010). Na Figura 2, observa-se os principais estresses abióticos em plantas.



Figura 2. Estresses abióticos em plantas (MARTINEZ, 2004).

5.1 Estresse Salino

O termo salinidade refere-se à existência de níveis de sais solúveis no solo que podem prejudicar, significativamente, o rendimento das plantas cultivadas e alterar de forma negativa as propriedades do solo (RIBEIRO et al., 2013). Estima-se que esse

problema é encontrado em 20% das terras cultivadas no mundo e aproximadamente metade das terras irrigadas estejam afetadas por sais (SAIRAM & TYAGI, 2004). A Salinidade do solo é considerada uma das maiores restrições à produção agrícola no mundo, afetando uma área estimada de 45 milhões de hectares de terras irrigadas em todo o globo, e com grandes possibilidades de que este problema afete outras áreas devido às mudanças climáticas globais e como consequência de práticas incorretas de irrigação (MUNNS & TESTER, 2008; RENGASAMY, 2010).

O estresse salino é um dos grandes problemas enfrentados não só nas regiões do Nordeste brasileiro, mas, também, em muitas outras regiões do mundo (SILVEIRA et al., 2016). A maioria das espécies vegetais quando são submetidas a condições de salinidade tem o seu crescimento reduzido afetando sua produtividade. As consequências desse estresse manifestam-se na planta tanto no âmbito fisiológico, bioquímico e molecular (WINICOV, 1998; MUNNS et al., 2002).

A presença de sais no solo reduz a capacidade da planta em absorver água, assim provoca uma redução no crescimento vegetal. Este efeito é conhecido como efeito osmótico que leva a planta ao déficit hídrico. Além disso, a absorção em excesso de íons de Na⁺ (sódio) possui um efeito semelhante ocasionando uma diminuição do crescimento da planta pelo efeito iônico (MANSOUR, 2014).

Os solos são classificados baseado na concentração de sais solúveis (expresso através da CE) extraídos da solução do solo e da porcentagem de sódio trocável do solo (PST). O limite da CE entre os solos salinos e solos não salinos tem constituído o valor de 4,0 dS m⁻¹ para extratos de pasta de saturada do solo (RICHARDS, 1954).

Os efeitos do estresse salino podem ser classificados em primários e secundários. Os primários incluem os efeitos tóxicos específicos dos íons; os danos na permeabilidade das membranas celulares e de organelas citoplasmáticas; o desequilíbrio metabólico nos processos fotossintético e respiratório; anabolismo e catabolismo de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos; reações enzimáticas e conversões de fitormônios (WILLADINO & CAMARA, 2005). Já os secundários incluem efeitos osmóticos e deficiência de nutrientes induzida pela competição dos íons Na⁺ e Cl⁻ com os demais durante o processo de absorção (LEVITT, 1980).

Quando as plantas são expostas à salinidade, o equilíbrio no transporte de íons Na⁺ e Cl⁻ e de outros nutrientes minerais essenciais é interrompido. O íon cloreto é um dos solutos que contribui para a redução do potencial osmótico celular facilitando a absorção de água, entretanto, seu excesso provoca clorose e necrose das folhas, ocasionando queda de produção (MARSCHNER, 1990).

Os distúrbios metabólicos gerados pelo acúmulo de Na^+ na célula são, em parte, resultantes da competição com o íon K^+ pelos sítios ativos das enzimas. O aumento da concentração de Na^+ é acompanhado de redução na absorção de K^+ nos tecidos vegetais, proporcionando aumento excessivo na relação Na^+/K^+ . Esta relação é usada como um índice que permite estimar a toxidez do íon Na^+ , uma vez que esse cátion inibe a atividade das enzimas dependentes do íon K^+ . A capacidade de manter essa relação relativamente baixa no citoplasma (cerca de 0,6) e a habilidade de transportar os íons Na^+ e Cl^- para longe dos sítios do metabolismo primário (folhas) são duas condições críticas para que ocorra o crescimento da planta em condições salinas (TESTER & DAVENPORT, 2003).

Sob estresse salino há redução no conteúdo de proteínas solúveis totais (SILVEIRA et al., 2003). Esse decréscimo pode refletir retardamento na síntese proteica ou aceleração na sua degradação, levando ao aumento na quantidade de aminoácidos livres ou à inibição da incorporação destes aminoácidos nas proteínas. A proteólise é uma das formas existentes para fornecer aminoácidos necessários para a manutenção celular durante distúrbios nutricionais, que podem ser causados pela salinidade (KUMAR et al., 2008).

As plantas possuem mecanismos de respostas ao estresse salino que envolvem uma série de ajustes fisiológicos, bioquímicos e moleculares ativados que atuam para minimizar os efeitos do estresse osmótico e iônico para que a planta mantenha seu crescimento e desenvolvimento mesmo sob condições de estresse (WILLADINO & CAMARA, 2005).

Segundo Dias & Blanco (2016), o teor de água disponível no solo é reduzido com a salinidade, entretanto, nem todas as culturas respondem de forma igual ao mesmo nível salino, pois algumas são mais tolerantes que outras e podem extrair água com mais facilidade. De acordo com os mesmos autores as plantas são classificadas em glicófitas e halófitas. As glicófitas representam o grupo das plantas cultivadas e, na sua maioria, são as menos tolerantes à ação dos sais, enquanto as halófitas compõem o grupo de plantas que adquirem condições fisiológicas, portanto, ajustam-se osmoticamente e sobrevivem em meio altamente salino. Com o aumento da concentração de sais solúveis no solo reduz o crescimento das plantas em função do aumento da tensão osmótica da solução do solo, diminuindo a absorção de água pelas plantas devido à acumulação de quantidades tóxicas de vários íons e de distúrbios no balanço de íons (HENRY & JOHNSON, 1977; CHHABRA, 1996).

O valor limiar da cultura da cana-de-açúcar é de 1,7 dS m⁻¹ limite abaixo do qual a cana-de-açúcar tem o seu desenvolvimento normal, sem efeitos generalizados (MAAS, 1984; DIAS & BLANCO, 2016). Nas fases iniciais como a germinação e na planta jovem, os sintomas do estresse são mais drásticos e nesta fase a planta apresenta maior sensibilidade (SENGAR et al., 2013; GUERZONI et al., 2014).

Segundo Blackburn (1984) a cultura não apresenta perda de produção a uma CE de 1,7 dS m⁻¹, porém a condutividade elétrica da água de irrigação de 3,3; 6,0; 10,4 e 18,6 dS m⁻¹ as perdas foram, respectivamente de 10%; 25%; 50% e 100%.

Sengar et al. (2013) relataram perdas de até 40% na produtividade de cana-de-açúcar na Índia devido a salinidade do solo. No entanto, essa resposta depende de fatores como: o tempo de exposição ao estresse, composição e concentração dos sais, método e frequência de irrigação, tipo e genótipo da cultura e ambiente no qual se está exposto. Nesse contexto, se faz necessário estudar as respostas das plantas em interação com os sais.

5.2 Estresse oxidativo

O estresse oxidativo pode ser definido como um desequilíbrio, em qualquer compartimento celular, entre os níveis endógenos de compostos antioxidantes e compostos oxidantes, ocasionando o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROS) (CASSELLYS & CURY, 2001; MOLLER, 2001).

As EROS são subprodutos do metabolismo celular regular e ocorrem naturalmente em processos como a fotossíntese e respiração (SOARES & MACHADO, 2007), sendo continuamente produzidas e removidas das células por mecanismos antioxidativos enzimáticos ou não enzimáticos (MITTLER, 2002).

As EROS podem inclusive atuar como moléculas sinalizadoras nos processos de crescimento e desenvolvimento celular (DEL RÍO et al., 2006). O estresse oxidativo é um fator central do fenômeno de estresses abióticos e bióticos que ocorre quando há um sério desbalanço entre a produção de EROS e as defesas antioxidantes (FOYER & NOCTOR, 2009). O rompimento do estado estacionário em favor da condição pro-oxidativa, elevando a concentração das EROS favorece injúrias celulares tendo como consequências danos às biomoléculas como DNA, lipídios, proteínas e carboidratos (SIES, 1986).

Esses danos se traduzem em diversos processos degenerativos incluindo peroxidação de lipídeos de membrana, que leva à diminuição de fluidez, perda do

conteúdo celular ou da organela e causa danos secundários às proteínas de membranas (HALLIWELL, 2006). As EROS são formadas como subprodutos tóxicos da respiração e fotossíntese. Os principais pontos de produção na célula, durante o estresse são as organelas com alta atividade de oxidação metabólica: mitocôndrias e cloroplastos. Contudo o fenômeno de fotorrespiração nos peroxissomos é outra forma de produção de H_2O_2 (SOARES-NETO, 2001).

O oxigênio molecular (O_2) é completamente reduzido por quatro elétrons transportados ao longo da cadeia respiratória, gerando água (H_2O). No entanto, uma pequena parcela dos elétrons escapada cadeia transportadora resultando em uma redução parcial do O_2 com a consequente produção das EROS. A transferência de um, dois ou três elétrons para o O_2 , resulta na formação do radical superóxido O_2^- , peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radical hidroxila (OH^\cdot), respectivamente (NEILL & GOULD, 2003).

Contrário ao superóxido, o peróxido de hidrogênio é capaz de transpor as membranas celulares facilmente. E tal como o superóxido, o H_2O_2 é pouco estável e, portanto, menos tóxico que outras espécies reativas de oxigênio; a principal ameaça imposta pelo superóxido e peróxido de hidrogênio está na habilidade de ambos gerarem altas quantidades da radical hidroxila (SGHERRI & NAVARI-IZZO, 1995). A radical hidroxila é considerada a EROS mais reativa em sistemas biológicos. Ela tem grande afinidade por moléculas biológicas em seu sítio de produção. A hidroxila apresenta uma meia-vida muito curta, pois reage muito rapidamente de forma não específica com as biomoléculas, sequestrando aleatoriamente um átomo de hidrogênio (BREUSEGEM et al., 2001).

As EROS são vistas como indicadores celulares de estresse e mensageiros secundários envolvidos em vários aspectos da expressão gênica e na tradução da química enzimática (FOYER & NOCTOR, 2009). Os radicais livres e outras espécies reativas de oxigênio, como o H_2O_2 , são produzidos de forma contínua em qual quer sistema vivo. Consequentemente, os organismos desenvolveram diversos sistemas antioxidantes de defesa, visando à proteção contra os possíveis danos causados pelas EROS (GRATÃO et al., 2005). A primeira linha de defesa contra o estresse oxidativo é evitar a produção das EROS (NOCTOR et al., 2004).

Uma vez formadas, as EROS devem ser eliminadas para minimizar os efeitos danosos. Diferentes mecanismos são utilizados pelas plantas para interromper a cascata de oxidação descontrolada (GRATÃO et al., 2005). Assim, mecanismos de desintoxicação constituem a segunda linha de defesa (MOLLER, 2001). A terceira linha

de defesa está relacionada ao reparo dos danos oxidativos. Os sistemas de defesa removem ou neutralizam as EROS. Estudos sugerem que o apoplasto, citosol, cloroplasto, mitocôndria e peroxissomo contêm mecanismos de defesa às EROS (NOCTOR et al., 2004).

6. Mecanismos de defesa ao estresse

6.1 Ajustes osmótico

Algumas plantas apresentam a capacidade de ajustar osmoticamente suas células em condições adversas, demonstrando a sua capacidade de aumentar a tolerância a períodos curtos de estresse, dando assim uma resposta bioquímica-fisiológica quando se encontra nesta condição (NEPONUCEMO et al., 2001).

Em várias espécies tem se identificado esse mecanismo de ajustar-se osmoticamente sob curtos períodos de estresse, sendo essa considerada uma das mais eficientes estratégias adaptativas do vegetal, por permitir a manutenção da turgescência celular, através da regulação e manutenção da abertura estomática e fotossíntese (SERRAJ & SINCLAIR, 2002; ABDUL JALEEL et al., 2007).

As plantas superiores quando estão sob condições de estresse abióticos ou bióticos, passam a acumular açúcares, aminoácidos, amins quaternárias, ácidos orgânicos, íons entre outros solutos (BARTELS & SUNKAR, 2005). Nesta condição a planta passa a produzir aminoácidos (prolina), carboidratos (frutose e glicose) e compostos quartanários (glicina betaína), a produção desses compostos promovem o ajuste osmótico, resultando em decréscimo do potencial osmótico, favorecendo a turgescência celular (BRAY et al., 2001).

Apesar de ser considerado um importante mecanismo de tolerância aos estresses abióticos, o ajuste osmótico não tem como principal função a de promover o aumento da produtividade, sendo considerada principal função a de promover a planta a capacidade de tolerar curtos períodos de estresse e conduzi-la à retomada do crescimento. Mas este mecanismo apresenta elevado gasto energético o que pode vir a ser negativo e prejudicar a produtividade da planta, de forma geral afetando a eficiência da água pela mesma (SERRAJ & SINCLAIR, 2002; TAIZ & ZEIGER, 2013).

Diversas substâncias possuem função osmoprotetora destacando-se a prolina, a glicina betaína e a trealose, que além de participarem do mecanismo de ajuste osmótico, podem apresentar outros efeitos protetores nas plantas (BRAY et al., 2001). Muitos trabalhos evidenciam que o acúmulo desses osmólitos constitui-se em um importante

critério para estudos de tolerância aos estresses abióticos, sendo utilizados como indicadores bioquímico-fisiológicos do estresse hídrico nas plantas (HONGBO et al., 2006; MARIN et al., 2006).

6.2 Enzimas

As enzimas do sistema antioxidante são bastante sensíveis às condições de estresse abiótico e servem, inclusive, como sinalizadoras do estresse. Destacam-se dentre elas: superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) (NOCTOR & FOYER, 1998).

A SOD é considerada uma primeira barreira enzimática contra o estresse oxidativo por converter o O_2 à H_2O_2 e $O_2.OH_2O_2$ deve ser removido a fim de evitar sua conversão em radicais mais reativos, como a radical hidroxila (OH). Para isso, as enzimas APX e CAT subsequentemente convertem o H_2O_2 à H_2O e O_2 (DELRIO et al., 2006). O equilíbrio da atividade das enzimas é essencial para determinar o nível fixo de O_2^- e H_2O_2 (BOWLER et al., 1991).

Diferentemente da CAT, que degrada diretamente o H_2O_2 sem consumir agentes redutores celulares, a detoxificação pela APX ocorre com a oxidação de ascorbato, reação que resulta em monodeidro ascorbato (MDHA) e H_2O . E a detoxificação pela SOD ocorre com a oxidação de compostos de natureza fenólica (NAKANO & ASADA, 1980). A polifenol oxidase (PPO) promove a oxidação enzimática de compostos doadores de hidrogênio como fenóis, ela utiliza doadores de elétrons aromáticos como o pirogalol (ASADA, 1999).

A ascorbato peroxidase (APX) é considerada a enzima mais importante na eliminação do H_2O_2 de certos compartimentos celulares, como os cloroplastos, onde não existem catalase para atuar nessa função (MITTLER, 2002). A APX oxida duas moléculas de ascorbato na redução do H_2O_2 . O ascorbato oxidado é regenerado pelo ciclo metabólico do ascorbato-glutationa, mediante a ação de outras enzimas (NOCTOR & FOYER, 1998).

As enzimas removedoras de EROS, além de remover o H_2O_2 favorecem o fotossistema I, tornando o NADP disponível para aceitar os elétrons provenientes da ferredoxina, minimizando assim a formação do radical aniônico superóxido (REDDY et al., 2004).

Sairam et al. (2002) demonstraram que os sistemas de remoção de EROS pelas enzimas ascorbato peroxidase, glutaciona redutase e catalase são importantes para a

diminuição da peroxidação lipídica, mantendo a estabilidade de membranas, bem como os conteúdos de clorofilas e carotenoides presentes.

O estresse resulta em diversas respostas metabólicas que variam em função do tipo de estresse aplicado, da espécie e variedade em estudo (WANG et al., 2003; RIZHSKY et al., 2004; SILVA et al., 2010). Durante o estresse oxidativo, geralmente, as atividades das enzimas antioxidantes aumentam nas diferentes espécies vegetais. Plantas com elevados níveis de antioxidantes, constitutivos e induzidos, têm mostrado maior resistência ao estresse oxidativo (MITTOVA et al., 2003).

6.3 Clorofila *a* e *b*

Os pigmentos naturais encontrados em maior quantidade nas plantas são as clorofilas que ocorrem nos cloroplastos das folhas e em outros tecidos vegetais. Diversos estudos em uma grande variedade de planta demonstram que os pigmentos clorofilianos são os mesmos. A diversidade de cores aparente dos vegetais está relacionada a presença e distribuição de outros pigmentos associados como os carotenoides os quais sempre acompanham as clorofilas (VON ELBE, 2000).

A clorofila *a* é empregada para realizar a fotoquímica (estágio inicial do processo fotossintético), já os demais pigmentos ajudam na absorção e transferência de energia radiante para os centros de reação, assim chamados de pigmentos acessórios. O principal pigmento acessório é a clorofila *b*, que está presente em vegetais superiores, algas e algumas bactérias (TAIZ & ZIEGER, 2013). As clorofilas são moléculas que são constituídas por complexos derivados da porfirina, tendo como átomo central o Mg (magnésio), esse composto possui uma estrutura macro cíclica assimétrica completamente insaturada composta por quatro anéis de pirrol (SCHOEFS, 2002).

As clorofilas *a* e *b* se observam na natureza com uma proporção de 3:1, respectivamente e apresentam diferença nos substituintes de carbono C-3. A clorofila *a* possui o anel de porfirina com um grupo metil (-CH₃) no C-3, já a clorofila *b* (pigmento acessório) contém um grupo aldeído (-CHO), que substitui o grupo metil-CH₃. Estes pigmentos se localizam nos cloroplastos, que é uma organela constituinte da fotossíntese, onde acontecem as duas reações mais importantes: a fotoquímica, nas membranas dos tilacóides e a bioquímica, no estroma do cloroplasto. Nestas organelas além de clorofilas ainda possui outros pigmentos acessórios, por exemplo, os carotenoides (carotenóides e xantofilas). As moléculas de clorofila apresentam ligações muito frágeis (não covalentes) que se rompem facilmente ao macerar o tecido em solventes orgânicos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDUL JALEEL, C. et al. Alterations in osmoregulations, antioxidante enzymes and indole alkaloid levels in *Catharanthus roseus* exposed to water defi cit. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.59, p.150-157, 2007.

ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera**: Introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba: Edição do Autor, 2002. 272p.

ASADA, K. The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of Active Oxygens and Dissipation of Excess Photons. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.50, p.601-639, 1999.

BARTELS, D.; SUNKAR, R. Drounht and salt tolerance in plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v24, p.23-58, 2005.

BERGONCI, J. I.; PEREIRA, P. G. Comportamento do potencial da água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, n.2, p.229-235, 2002.

BLACKBURN, F. *Sugar-cane*. New York: **Longman**, 1984. 414p.

BOWLER, C. et al. Manganese superoxide dismutase can reduce cellular damage mediated by oxygen radicals in transgenic plants. **The EMBO Journal**, Heidelberg, v.10, n.7, p.1723-1732, 1991.

BRAY, E. A. et al. Responses to abiotic stresses. **In**: Biochemistry and molecular biology of plants, Buchanan BB, Gruissem W, Jones RL (Eds.). Am Soc Plant Physiologists, Rockville, Maryland, USA, p.1158-1203, 2001.

BREUSEGEM, F. V. et al. The role of active oxygen species in plant signal transduction. **Plant Science**, v.161, n.3, p.405-414, 2001.

CAIRO, P. A. R. **Curso básico de relações hídricas de plantas**. Vitória da Conquista: UESB, 1995. 32p.

CASSELLYS, A.C.; CURY, R. F. Oxidative stress and physiological, epigenetic and genetic variability in plant tissue culture: implications for micro propagators and genetic engineers. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v.64, p.145-157, 2001.

CHHABRA, R. Soil salinity and water quality. Rotterdam: A.A. **Balkem a Publishers**, 1996. 283p.

CHICONATO, D. A. **Estresse salino em plantas jovens de cana-de-açúcar: Respostas bioquímicas e fisiológicas**. 2016. 89p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

DEL RÍO, L. A. et al. Reactive oxygen species and reactive nitrogen species in peroxisomes: production, scavenging, and role in cell signaling. **Plant Physiology**, v.141, p.330-335, 2006.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. Efeito dos sais no solo e na planta e tolerância das culturas à salinidade. **In: GHEYI, H.R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C.F; GOMES FILHO, E.** Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e Aplicados. 2ed. Fortaleza: INCTSal, 2016, Cap.11, p.151-161.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. **In: SANTOS, F. et al. (Eds.).** Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool – Tecnologias e perspectivas. Viçosa: UFV, p.25-49, 2010.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Water in agriculture: opportunity un tapped**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009.

FOYER, C.; NOCTOR, G. Redox regulation in photosynthetic organisms: signaling, acclimation and practical implications. **Antioxid Redox Signal**, v.11, p.1-45, 2009.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane **.In: TEARE, I. D.; PEET, M. M.** Crop-water relations. New York: John Wiley. 1983. 547p.

GODOY, A. P. **Modelagem de processos de acumulação de biomassa e de açúcar da cana-de-açúcar via sistemas nebulosos.**2007. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GONÇALVES, E. R.; FERREIRA, V. M.; SILVA, J. V. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.378-386, 2010.

GRATÃO, P. L.; POLLE, A.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, v.32, p.481-494, 2005.

GUERZONI, J.T.S.; BELINTANI, N.G.; MOREIRA, R.M.P; HOSHINO, A.A.; DOMINGUES, D.S.; BESPALJOK FILHO, J.C.; VIEIRA, L.G.E. Stress-induced D1-pyrroline-5- carboxylate synthetase (P5CS) gene confers tolerance to salt stress in transgenic sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.36, p.309-319, 2014.

GUPTA, B.; HUANG, B. Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. **International Journal of Genomics**, v.1, p.1-18, 2014.

HALLIWELL B. Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. **Plant Physiology**, v.141, p.312-322, 2006.

HATCH, M. D.; SLACK, C. R.; JOHNSON, H. S. Further studies on a new pathway of photosynthetic CO₂ fixation in sugarcane and its occurrence in other plant species. **Journal Biochemical**, v.102, n.1, p.417-422, 1967.

HENRY, J. L.; JOHNSON, W. E. **The nature and management of salt-affected soils in Saskatchewan.** Saskatoon.University of Saskatchewan, 1977. 26p.

HONGBO, S.; ZONGSUO, L.; MINGAN, S. Osmotic regulation of 10 wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes at soil water deficits. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.47, n.2, p.132-139, 2006.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugar cane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v.92, n.4, p.185-202, 2005.

JADOSKI, C. J. et al. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v.3,n.2,p.169-175, 2011.

JONES, H. G. **Plant and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2ª Ed. University Press, 1992. 428p.

KUMAR, N.; PAMIDIMARRI, S. D. V. N.; KAUR, M. et al. Effects of NaCl on growth, ion accumulation, protein, proline contents and antioxidant enzymes activity in callus cultures of *Jatropha curcas*. **Biologia**, v.63, p.378-382, 2008.

LACHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA, 2000.531p.

LAWLOR, D. W. Genetic engineering to improve plant performance under drought: physiological evaluation of achievements, limitations, and possibilities. **Journal of Experimental Botany**, v.64, n.1, p.695-709, 2013.

LEVITT, J. **Response of plants to environmental stress**. New York: Academic. p.447, 1980.

LONG, S. P.; WOOLHOUSE, H. W. Responses of net photosynthesis to light and temperature in *Spartina townsendii* C4 species from a cool temperate climate. **Journal of Experimental Botany**, v.29, n.3, p.803-814, 1978.

MAAS, E. V. Crop Tolerance. *California Agriculture*, v.36 n.10, p.20-21, 1984.

MANSOUR, M. M. F. The plasma membrane transport systems and adaptation to salinity. **Journal of Plant Physiology, Stuttgart**, v.171, n.18, p.1787-1800, 2014.

MANSUR, R. J. C. N.; BARBOSA, D. C. A. Comportamento fisiológico em plantas jovens de quatro espécies lenhosas da caatinga submetidas a dois ciclos de estresse hídrico. **Phyton**, n.68, p.97-106, 2000.

MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, E.C.; RIBEIRO, R.V. Photosynthetic limitations imposed by self-shading infield-grown sugarcane varieties. **Field Crops Research**, v.155, p.30-37, 2014.

MARIN, A.; SANTOS, D.M.M. dos; BANZATTO, D.A.; CODOGNOTTO, L.M. Influência da disponibilidade hídrica e da acidez do solo no teor de prolina livre de guandu. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.355-358, 2006.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**, London, p.672, 1990.

MARTINEZ, C. A. **Mecanismos de defesa das plantas ao estresse**. II Simpósio Paulista sobre Nutrição de Plantas Aplicada em Sistemas de Alta Produtividade. Unesp-Jaboticabal. Palestra em PDF acesso em 03/11/2016. v.55,n.1, p.139-145, 2004.

MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F.; ARIZONO, H. Melhoramento da cana-de-açúcar. **In: BORÉM, A. (Ed.). Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: Ed. da UFV, p.205-251,2005.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trend sin Plantin Science**, v.9, p.405-410, 2002.

MITTOVA, V.; TAL, M.; VOLOKITA, M.; GUYYY, M. Upregulation of the leaf mitochondrial and peroxisomal antioxidativa systems in response to salt-induced oxidative stress in the wild salttolerance tomato species *Lycopersicon penellii*. **Plant Cell Environ**, v.26, p.845-856, 2003.

MOLLER, I. M. Plant Mitochondria and Oxidative Stress: Electron Transport, NADPH Turnover, and Metabolism of Reactive Oxygen Species. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.52, p.561-591, 2001.

MUHAI DAT, R.; SAGE, R.F.; DENGLER, N.G .Diversity of Kranz anatomy and biochemistry in C4 eudicots. **Jornal Botany**, v.94,p.362-381, 2007.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell and Environment**, v.25, p.239-250, 2002.

MUNNS, R. Plant Adaptations to Salt and Water Stress: Differences and Commonalities. **Advances in Botanical Research**, v.57, p.1-32, 2011.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanism of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.651-681, 2008.

MUSSI, L. **Eficiência fotodinâmica das protoporfirinas IX de magnésio e zinco**.2003.73p. Dissertação (Mestrado em Química) - Curso de Pós- Graduação em Química, Instituto de Química, Unicamp.

NAKANO, Y., ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplast. **Plant Cell Physiol**, v.22. p. 867-880, 1980.

NEILL, S.O.; GOULD, K.S. Anthocyanins in leaves: light attenuators or antioxidants? **Functional Plant Biology**, v. 30, p.865–873, 2003.

NELSON, T. The grass leaf developmental gradient as a platform for systems understanding of the anatomical specialization of C4 leaves. **Journal of Experimental Botany**, v.62, p.3039-3048, 2011.

NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. et al. Tolerância a seca em plantas: mecanismos fisiológicos e moleculares. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, n. 23, p. 12-18, 2001.

NOCTOR, G. FOYER, C. H. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. **Annual review of plant physiology and plant molecular biology**, v.49, p.249-279, 1998.

NOCTOR, G.; DUTILLEUL, C.; DE PAEPE, R.; FOYER, C. H. Use of mitochondrial electron transport mutants to evaluate the effects of redox state on photosynthesis, 36 stress tolerance and the integration of carbon/nitrogen metabolism. **Journal of Experimental Botany**, v.55, n.394, p.49-57, 2004.

PATADE, V. Y., BHARGAVA, S., SUPRASANNA, P. Salt and drought tolerance of 4 sugarcane under iso-osmotic salt and water stress: growth, osmolytes accumulation, 5 and antioxidant defense. **Journal of Plant Interactions**, v.6, p.275-282, 2011.

PIMENTEL, C. Metabolismo de carbono na agricultura tropical. **Seropédica**: EDUR, 1998.150p.

PRISCO, J. T.; GOMES FILHO, E. Fisiologia e bioquímica do estresse salino em plantas. **In**: GHEYI, H.R.; DIAS, N.S.; LACERDA, C.F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza, INCTSal, 2010. Cap.10, p.143-159.

REDDY, A. R.; CHAITANYA, K. V.; VIVEKANANDAN, M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. **Journal of Plant Physiology**, v.161, n.11, p.1189-1202, 2004.

RENGASAMY P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. **Functional Plant Biology**, v. 37, n.7, p.613-620, 2010.

RIBEIRO, R. V.; MACHADO, R. S.; MACHADO, E. C.; MACHADO, D. F. S. P. Revealing drought-resistance and productive patterns in sugarcane genotypes by evaluating both physiological responses and stalk yield. **Experimental Agriculture**, v.49, n.2, p.212-224, 2013.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington D.C, U.S. Salinity Laboratory, 1954.160p. (USDA Agriculture Handbook, 60).

RIZHSKY, L.; LIANG, H.; SHUMAN, J.; SHULAEV, V. et al. When Defense Pathways Collide. The Response of Arabidopsis to a Combination of Drought and Heat Stress. **Plant Physiology**, v. 134, p. 1683-1696, 2004.

ROBERTO, G. G. **Fisiologia da maturação de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): Sinalização e controle do metabolismo de produção e armazenamento de sacarose**. 2015. 52f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical), Instituto Agrônomo, Campinas, São Paulo.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, Instituto de Biociências, 1995. 101p.

SAGE, R.F. The evolution of C4 photosynthesis. **New Phytologist**, Berlin, v.161, p.341–370, 2004.

SAIRAM, R. K.; TYAGI, A. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance. **Current Science**, v.86, p.407-421, 2004.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.3, p.287-294, 1998.

SASSAKI, R.M.; MACHADO, E.C. Trocas gasosas e condutância estomática em duas espécies de trigo em diferentes teores de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.9, p.1571-1579, 1999.

SCHOEFS, B. Chlorophyll and carotenoid analysis in food products. Properties of the pigments and methods of analysis. **Trends in Food Science & Technology**, v.13, p.361-371, 2002.

SENGAR, K.; SENGAR, R. S.; SINGH, A. Biotechnological and Genomic Analysis for Salinity Tolerance in Sugarcane. **International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research**, v.4, n.5, p. 407-414, 2013.

SERRAJ, R.; SINCLAIR, T. R. Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions? **Plant, Cell and Environment**, v.25, p.333- 341, 2002.

SGHERRI, C. L. M.; NAVARRI-IZZO, F. Sunflower seedlings subjected to increasing water deficit stress: oxidative stress and defence mechanisms. **Physiologia Plantarum**, v.93, p.25-30, 1995.

SIES, H. Biochemistry of oxidative stress. **Angew ChemInt.** v.25, p.1058-1071, 1986.

SILVA, E. N.; RIBEIRO, R. V.; FERREIRA-SILVA, S. L.; VIÉGAS, R. A.; SILVEIRA, J. A. G. Comparative effects of salinity and water stress on photosynthesis, water relations and growth of *Jatropha curcas* plants. **Journal of Arid Environments**, v.74, p.1130-1137, 2010.

SILVEIRA J. A. G. et al. Proline accumulation and glutamine synthetase activity are increased by salt-induced proteolysis in cashew leaves. **Journal of Plant Physiology**, v.160, n.2, p.115-123, 2003.

SILVEIRA, J. A. G.; SILVA, S.L.F.; SILVA, E.N.; VIEGAS, R.A. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. **In: GHEYI, H.R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C.F; GOMES FILHO, E. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados.2ed. Fortaleza, INCT Sal, 2016,Cap.13, p.181-196.**

SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v.98, p.91-97, 2006.

SOARES, A. M. S.; MACHADO, O. L. T. Defesa de plantas: Sinalização química e espécies reativas de oxigênio. **Revista Trópica-Ciências Agrárias e Biológicas**, v.1, p.9-19,2007.

SOARES-NETO, L. E. Oxidative stress response in sugarcane. **Genetics and Molecular Biology**, v. 24, n.1, p.93-102, 2001.

SZABADOS, L. KOVA, H.; ZILBERSTEIN, A. Z.; BOUCHEREAU, A. Plants in Extreme Environments: Importance of Protective Compounds in Stress Tolerance. **Advances in Botanical Research**, v.57, p.105-150, 2011.

- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 526p.
- TAVARES, A. C. S. **Sensibilidade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao excesso de água no solo**. 2009. 220f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- TERAMOTO, E.R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) baseados em parâmetros de solo e clima**. 2003. 96f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. **Annals of Botany**. V. 91, p.503-527, 2003.
- VON ELBE J.H. Colorantes. In: FENNEMA, O.W. **Química de los alimentos**. 2.ed. Zaragoza: Wisconsin - Madison, 2000. Cap.10, p.782-799.
- VOZNESENSKAYA, E. V.; FRANCESCHI, V. R.; EDWARDS, G. E. Light-dependent development of single cell C4 photosynthesis in cotyledons of *Borszczowia aralocaspica* (Chenopodiaceae) during transformation from storage to a photosynthetic organ. **Botany**, v. 93, p.1-11, 2004.
- WANG, W.; VINOCUR, B.; ALTMAN, A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. **Planta**, v.218, p.1-14, 2003.
- WILLADINO, L.; CAMARA, T.R. Aspectos fisiológicos do estresse salino em plantas. **In:** Eds. NOGUEIRA, R. J. M. C.; ARAÚJO, E. L.; WILLADINO, L. G.; CAVALCANTE, U. M. T. Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas, p.118-126, 2005.
- WINICOV, I. New molecular approaches to improving salt tolerance in crop plants. **Annals of Botany**, v.82, p.703–710,1998.

CAPÍTULO 2

TROCAS GASOSAS EM PLANTAS DE CANA-DE-ACÚCAR SUBMETIDAS A ESTRESSE SALINO E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO

CAPÍTULO 2 – TROCAS GASOSAS EM PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A ESTRESSE SALINO E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO

RESUMO

Na região Nordeste, as grandes áreas de cultivo de cana-de-açúcar se concentram em regiões litorâneas. Nessas áreas as fontes de águas utilizadas para a irrigação apresentam altos teores de sais, causando a salinização dos solos, reduzindo o desenvolvimento das plantas em virtude dos efeitos das trocas gasosas. Objetivou-se avaliar o efeito da salinidade da água de irrigação e frações de lixiviação nas trocas gasosas da cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, no período de novembro 2016 a novembro de 2017. Foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 5 x 2: 5 níveis de salinidade da água de irrigação (0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dS m⁻¹) e 2 frações de lixiviação (0 e 0,17) correspondendo a 100% e 120% da evapotranspiração da cultura, com 4 repetições. A água (0,5 dS m⁻¹) utilizada no experimento é proveniente da rede de distribuição da UFRPE, onde foram adicionados os sais NaCl e CaCl₂ (1:1) molar Na/Ca para obtenção dos níveis salinos. Foi utilizada a variedade de cana-de-açúcar 'RB 92579', semeada na forma de rebolos em lisímetros de drenagem. Aos 60 dias após a semeadura (DAS), iniciou-se a aplicação dos tratamentos através de um sistema de irrigação por gotejamento. A partir dos 60 DAS, foram realizadas três leituras com intervalo de 60 dias, no horário entre 11 e 13 h com Analisador de Gás Infravermelho (IRGA LI-6400), onde foram determinadas as seguintes variáveis: fotossíntese (*A*), condutância estomática (*g_{sw}*), transpiração (*E*), concentração interna de CO₂ (*C_i*) e temperatura foliar (*T_{Leaf}*). De modo geral, a interação (salinidade e lâminas) promoveu reduções médias percentuais nas trocas gasosas: *A* (45,9 e 22,1%), *g_{sw}* (64,71 e 45,9%) e *C_i* (49,38% e 21,01%), para as condições sem fração e com fração de lixiviação, respectivamente. Em relação aos efeitos isolados, a salinidade promoveu reduções na ordem de: *E* (40,37%), *T_{Leaf}* (8,18%). Já para o efeito isolado para as lâminas, observou-se incrementos de: *E* (+22,2%), *C_i* (+18,99%) e uma redução para a temperatura *T_{Leaf}* (-3,80%). A fração de lixiviação de 0,17 apresentou a capacidade de reduzir os efeitos deletérios dos sais sobre as variáveis analisadas.

Palavras-chave: Estresse abiótico, eficiência fotossintética, fração de lixiviação, *Saccharum officinarum*

CHAPTER 2 - GAS EXCHANGES IN SUGARCANE PLANTS SUBMITTED TO SALINE STRESS AND LEAKING BLADES

ABSTRACT

In the Northeast, large areas of sugarcane cultivation are concentrated in coastal regions. Levels of areas such as water sources used for irrigation, high salt content, causing salinization of soils, and the development of plants due to the effects of gas exchange. The effect of salinity of irrigation water and leaching fractions on the gas exchange of sugarcane was objectified. The experiment was conducted in the Agricultural Engineering Department of the Federal Rural University of Pernambuco, Recife, PE, from November 2016 to November 2017. It was conducted in a completely randomized design, in a 5 x 2 factorial arrangement: 5 levels of salinity irrigation water (0.5, 2.0, 4.0, 6.0 and 8.0 dS m⁻¹) and 2 leaching fractions (0 and 0.17) corresponding to 100% and 120% of the evapotranspiration of culture with 4 replicates. Water (0.5 dS m⁻¹) was not used in the UFRPE distribution network, where NaCl and CaCl₂ (1: 1) molar Na / Ca salts were used to obtain saline levels. A sugar cane recipe "RB 92579" was used, sown in the form of wheels in drainage lysimeters. At 60 days after sowing (DAS), the treatments were started using a drip irrigation system. From 60 DAS, the readings were sequenced with a 60-day interval, between 11 and 13 h with Infrared Analyzer (IRGA LI-6400), where the following variables were defined: photosynthesis (A), stomatal conductance (g_{sw}), transpiration (E), internal CO₂ concentration (C_i) and leaf temperature (T_{Leaf}). In general, interaction and advertising promoted reductions in percentages of gas exchange: A (45.9 and 22.1%), g_{sw} (64.71 and 45.9%) and C_i (49.38% and 21.0% 01%), for the conditions without fraction and with fraction of leaching, respectively. Regarding the logical effects, a salinity promoted reductions in the order of: E (40,37%), T_{Leaf} (8,18%). For the effect for the slides, there were increases of: E (+ 22.2%), C_i (+ 18.99%) and a reduction for the temperature of T_{Leaf} (-3,80%). The leaching fraction of 0.17 showed an ability to edit the deleterious effects of the salts on the analyzed variables.

Key-words: Abiotic stress, photosynthetic efficiency, leaching fraction, *Saccharum officinarum*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se no cenário mundial por seu grande potencial agrícola, ocupando atualmente a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, estando presente entre os maiores importadores de açúcar e etanol (MAPA, 2018). O etanol é o principal produto de interesse econômico, devido à sua importância como uma fonte de energia renovável alternativa ao petróleo. Estima-se que a produção nacional dobre na próxima década, a fim de atender à crescente demanda mundial (CHEAVEGATTIGIANOTTO et al., 2011).

Em Pernambuco, na safra 2016/2017, foram cultivados 243,17 mil hectares com uma produção de 11,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar para todos os usos obtendo uma produtividade de 48,5 Mg ha⁻¹. A estimativa para a safra 2017/2018 é um aumento da área plantada para 259,5 mil hectares, com uma produção de 13.693,5 milhões de toneladas, correspondendo a uma produtividade de 52,8 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2018).

No estado de Pernambuco, as grandes áreas de produção estão concentradas nas áreas costeiras. A irregularidade de distribuição sazonal da precipitação torna indispensável a prática da irrigação para obtenção de bons rendimentos. Essa irrigação é feita na maioria das vezes, pela utilização de águas subterrâneas que tem sua qualidade reduzida devido a exploração em excesso superior a recarga natural do aquífero, e, conseqüente avanço da água do mar em relação ao continente tornando-a salobra ou salina (CUSTÓDIO, 2010; COSTA SOBRINHO, 2014; FERREIRA, 2014).

A salinidade é um dos estresses que mais limita o crescimento devido à redução do potencial osmótico da solução do solo e diminuindo a disponibilidade de água para as plantas, além de proporcionar efeito tóxico de certos íons às plantas (SAIRAM & TYAGI, 2004).

Nessas condições, o metabolismo vegetal e a translocação de nutrientes também sofrem alterações, a abertura dos estômatos e a fotossíntese são reduzidas, conseqüentemente o potencial de produção da planta é reduzido (MUNNS & TESTER, 2008).

Os mecanismos de adaptação ao estresse salino variam entre espécies e entre genótipos de uma mesma espécie, assim, tecnologias são necessárias para que o problema da salinização de áreas agrícolas não venha agravar-se.

De acordo com Puga et al. (2016) uma das técnicas utilizadas para controle de sais no solo é o uso da fração de lixiviação, que consiste em aplicar na irrigação uma lâmina de água além da necessidade da cultura, para que os sais, provenientes da água de

irrigação e/ou presentes no solo sejam lixiviados da zona radicular, permitindo bons rendimentos de produção das culturas.

A cana-de-açúcar é uma planta glicófita, classificada como moderadamente sensível à salinidade e apresentando valor médio de salinidade limiar de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$, limite abaixo do qual a cana consegue ter seu desenvolvimento normal, sem efeitos generalizados (MAAS, 1984; MUNIR & AFTAB, 2009; DIAS & BLANCO, 2010).

O aumento da salinidade nas fases iniciais de desenvolvimento da cana-de-açúcar pode reduzir sua evapotranspiração em até 20% (SANTANA et al., 2007). Tais alterações promovem mudanças no metabolismo, prejuízo nutricional, no balanço hormonal e na produção de enzimas do complexo antioxidativo (PRISCO et al., 2010).

Além disso, a condutância estomática, que responde às variações de disponibilidade de água no meio de cultivo, de maneira a regular as trocas gasosas de dióxido de carbono e vapor d'água entre a cultura e o ambiente também é afetada (SMIT & SINGELS, 2006).

Devido à importância da cana-de-açúcar, as compreensões dos mecanismos fisiológicos que auxiliam na tolerância e resposta da cultura ao estresse salino contribuem significativamente para indicar o melhor manejo visando obtenção de maiores rendimentos agrícolas (MELONI et al., 2004; KAVIKISHOR et al., 2005).

Assim, objetivou-se avaliar o efeito da salinidade da água de irrigação e frações de lixiviação nas trocas gasosas da cana-de-açúcar em Recife, PE.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do estudo

O experimento foi conduzido no período de novembro de 2016 a novembro de 2017, em lisímetros de drenagem na Estação de Agricultura Irrigada Prof. Ronaldo Freire de Moura, localizada no Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Recife, localizada a $8^{\circ} 01' 05''$ de latitude Sul e $34^{\circ} 56' 48''$ de longitude Oeste, e altitude de 6,5 m.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é As, Megatérmico Tropical (tropical úmido) (ALVARES et al., 2014). A precipitação média é de 2.263,5 mm ano⁻¹, sendo que a maior concentração ocorre entre o outono e o inverno, apresentando uma média de 377,9 mm no mês de mais chuvoso (junho); as temperaturas máxima e mínima do ar de 29,1 e 21,8 °C, respectivamente; a umidade relativa do ar

média 79,8%, insolação 2550,7 horas. O total de evapotranspiração média estimada para a região está entre 1.000 e 1.600 mm ano⁻¹ (BARROS, 2016; INMET, 2018).

2.2 Caracterização das unidades experimentais

A área experimental possui as seguintes dimensões 32 m x 75 m (2400 m²), sendo localizada na parte central duas áreas correspondendo a uma estação lisimétrica (18 x 25,80 m) uma estação meteorológica (18 x 14,20 m), cercadas com estaca de concreto, fios de arame farpado e uma tela de nylon para evitar a entrada de animais.

A área experimental é composta por 40 lisímetros de drenagem (Figura 1 A) de cimento reforçado com fio sintético da linha BRASILIT, com capacidade de 1.000 L cada, diâmetro externo na borda superior 1,38 m e altura externa de 0,745 m.



Figura 1. Vista geral dos lisímetros de drenagem (A); Estação meteorológica (B); Vista externa e interna da casa de coleta e medição do material drenado (C, D). **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os lisímetros foram instalados de forma equidistantes a 1,20 m, nas duas direções, e assentados a 0,65 m de profundidade, deixando-se uma borda de 0,10 m acima da

superfície do solo para evitar a entrada de água de chuva ou irrigação, proveniente do escoamento superficial.

A estação meteorológica automática (Campbell Scientific, modelo CR1000) (Figura 1 B), foi utilizada para obtenção de dados climáticos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) diária. Além da estação meteorológica, também há uma casa de coleta do material drenado (Figura 1 C e 1 D).

2.3 Características do solo

Para o preenchimento dos lisímetros foi utilizado material de solo proveniente do Município de Goiânia, PE (7° 33' 38" de latitude Sul e 35° 00' 09" de longitude Oeste e altitude de 13 m) classificado como Espodossolo, segundo a classificação do Sistema Brasileiro de classificação de solos (SANTOS et al., 2013). As propriedades físico-químicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físico-químicos do solo dos lisímetros de drenagem (0-40cm)

Atributos Químicos do solo	Valores
pH (H ₂ O)	6,5
P (mg dm ⁻³)	49
Ca ⁺² (cmol _c dm ⁻³)	1,6
Mg ⁺² (cmol _c dm ⁻³)	0,65
Na ⁺² (cmol _c dm ⁻³)	0,06
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,08
Al ⁺³ (cmol _c dm ⁻³)	0,0
H (cmol _c dm ⁻³)	3,05
Soma de Bases (cmol _c dm ⁻³)	2,4
Capacidade de troca de cátions (cmol _c dm ⁻³)	5,4
Saturação por bases -V (%)	44
Saturação por alumínio - m (%)	0
Atributos Físicos do solo	Valores
Materia Orgânica (g kg ⁻¹)	20,4
Areia (g kg ⁻¹)	890
Silte (g kg ⁻¹)	30
Argila (g kg ⁻¹)	80
Densidade do solo - D _s (g cm ⁻³)	1,80
Densidade de partículas - D _p (g cm ⁻³)	2,63
Umidade volumétrica - θ: 0,33atm (%)	3,02
Umidade volumétrica - θ: 0,15atm (%)	1,34

2.4 Adubação Mineral

Após o resultado da análise de solo e por meio da Recomendação de adubação para o Estado de Pernambuco (CAVALCANTE et al., 2008), não houve a necessidade de

correção do pH do solo devido o pH já está em um valor ideal, assim, foi realizada só adubação mineral com nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). A aplicação em fundação (Figura 2), consistiu na aplicação de: 20 kg ha⁻¹ de N, 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 35 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente; aos 45 e 150 dias após a semeadura (DAS), foi realizada a adubação de cobertura, aplicando-se 20 kg ha⁻¹ de N e 35 kg ha⁻¹ de K₂O.

A.



B.



C.



D.



Figura 2. Adubação de fundação: adubos utilizados (A); aplicação no sulco (B); vista do sulco após a aplicação (C) e adubação de cobertura (D). **Fonte:** Elaborado pelo autor.

A aplicação dos micronutrientes foi realizada via adubação foliar. Como fonte de N foi utilizado uréia, para o fósforo o super simples e para o potássio o cloreto de potássio.

2.5 Plantio e condução da cultura

A cultivar de cana-de-açúcar plantada foi a RB 92579. Para o plantio dos rebolos foram abertos sulcos com cerca de 15 cm de profundidade, após a abertura dos sucos e antes do plantio aplicou-se o inseticida Regente 800 WG no sulco de plantio para evitar possíveis problemas com pragas de solo. O plantio foi realizado conforme a Figura 3.

A.



B.



C.



D.



Figura 3. Etapas para o plantio dos rebolos; Abertura dos sulcos de plantio (A); Aplicação do Regente e da adubação (B); Deposição dos rebolos no sulcos (C) e Vista da deposição dos rebolos no sulco (D). **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Em cada lisímetro foram colocados oito rebolos por metro linear com duas gemas cada um, no qual se realizou o desbaste para a permanência de 8 plantas m^{-1} . O espaçamento entre linhas foi de 1,20 m. Após o plantio, realizou-se tratos culturais e o controle fitossanitário visando o bom desenvolvimento da cultura (capinas, controle de pragas e doenças).

2.6 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 5 x 2, com quatro repetições totalizando 40 parcelas experimentais. Os tratamentos consistiram da utilização de cinco águas com níveis crescentes de condutividade elétrica (CE), a saber: 0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dSm^{-1} e duas frações de lixiviação (0 e 0,17), correspondendo as lâminas de 100 e 120% da evapotranspiração da

cultura. A aplicação dos tratamentos foi iniciada aos 60 dias após a semeadura (DAS), visto que na fase inicial a cultura apresenta grande sensibilidade à presença de sais.

2.7 Características do sistema de irrigação

2.7.1 Preparo e armazenamento da água de irrigação

Os diferentes níveis de salinidade foram obtidos pela adição de NaCl e CaCl₂ na proporção de 1:1 molar Ca/Na na água de abastecimento local da UFRPE que apresenta uma condutividade elétrica média de 0,5 dSm⁻¹, conforme Rhoades et.al (2000):

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

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

em que:

Q = quantidade de sais (mg L⁻¹);

CEa = representa o valor desejado da condutividade elétrica da água (dS m⁻¹).

O preparo e armazenamento foram realizados em cinco caixas de água de 500 L, com uma caixa para cada tratamento. O monitoramento da condutividade elétrica (CE) ocorreu a partir de um condutivímetro portátil.

2.7.2 Sistema de irrigação

Foi utilizado o gotejamento, por se tratar de sistema que aplica a água de forma localizada, possuindo uma grande uniformidade e eficiência na aplicação de água. Para o dimensionamento do sistema tem que ser levado em conta que para cada solução irrigante existe duas lâminas de lixiviação L1 e L2 (0 e 0,17) e cinco níveis de salinidade, assim necessitando de 10 linhas de derivação. Os reservatórios foram colocados lado a lado, iniciando do T1 ao T5, para facilitar o acoplamento das bombas às caixas foram conectadas com um tubo de PVC marrom 32 mm, onde uma bomba foi conectada com a utilização de uma união 1” para possibilitar a aplicação de cada tratamento cada caixa tem um registro.

Para a aplicação das soluções irrigantes foi utilizado duas eletrobombas (Modelo QB80) com 0,5 CV monofásicas com pressão de serviço de 14 m.c.a. O sistema de recalque é composto por duas linhas principais (uma para cada bomba) de PVC 25 mm que abasteceram as 10 linhas de derivação referente a cada tratamento para isto cada linha de derivação possui um registro. Para compor as linhas de derivação utilizou-se tubulações de polietileno de 32 mm, que se acoplou as linhas laterais para a irrigação dos

lisímetros. As linhas laterais são de polietileno de 16 mm. Em cada linha lateral foi inserido os gotejadores autocompensantes, espaçados a 0,30 m, tipo PCJ/CNL da NETAFIM. Cada lisímetro tem quatro emissores com vazão unitária de 4 L h⁻¹ e pressão média de serviço de 10 m.c.a.

2.7.3 Manejo do sistema de irrigação

Na fase inicial da cultura, até os 60 DAP foi realizado irrigações diárias utilizando a água de abastecimento da UFRPE com o objetivo de suprir a demanda hídrica da cultura, mantendo o solo em capacidade de campo, assim assegurando a brotação inicial e o estabelecimento das plantas. Os tratamentos têm como base a evapotranspiração da cultura (ETc) para a reposição das lâminas de reposição de 100% e 120% da ETc:

$$ETc = ETo \times Kc \times Kl_{med} \quad (3)$$

em que:

ETc = evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹); ETo = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Kc = coeficiente de cultivo (adimensional); Kl_{med} = coeficiente de localização médio, (adimensional). O Kc utilizado foi correspondente a cada fase fenológica da planta, de acordo com Doorenbos & Pruitt (1977). E o valor de Kl_{med} foi determinado segundo metodologia proposta por Keller & Bliesner (1990).

2.7.4 Avaliação da uniformidade do sistema

A determinação da uniformidade do sistema foi realizada segundo a metodologia proposta por Keller & Karmelli (1974), na qual se mede as vazões dos seguintes gotejadores ao longo da linha lateral: primeiro gotejador, gotejador situado a 1/3 do comprimento, gotejador situado a 2/3 do comprimento e no ultimo gotejador. Com o auxílio de uma proveta graduada e de um cronômetro, foi medido a vazão durante 30 segundos, com três repetições em cada gotejador analisado e a pressão será monitorada com a utilização de manômetro de Bourdon.

2.8 Variáveis fisiológicas

As repostas fisiológicas das plantas aos tratamentos foram analisadas com o IRGA LI 6400 (Figura 4), sendo realizadas três leituras durante o ciclo da cultura aos 90, 150 e 210 dias após a semeadura (DAS).

A.



B.



C.



D.



Figura 4. Analisador de fotossíntese modelo LI-6400 (Licor, Lincoln NE, USA) (A), monitoramento das trocas gasosas em campo (B), (C) e (D). **Fonte:** Elaborado pelo autor.

As medidas foram realizadas em uma planta por lisímetro, feita a medição na terceira folha com bainha visível conhecida como folha TVD (Top Visible Dewlap) ou folha +3 (Kuijper) de acordo com a numeração proposta por Kuijper (DILLEWIJN, 1952), considerada a folha fisiologicamente madura e não sombreada. As leituras foram realizadas entre as 11 e 13 horas, horário de brilho do sol intenso e elevada demanda evapotranspirométrica, para evitar instabilidades causadas por variações rápidas da radiação solar, com densidade de fluxo de fótons fotosinteticamente ativos superiores a $2000 \mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$.

2.9 Variáveis meteorológicas

No período de avaliação da cana planta (novembro 2016 a novembro de 2017), a temperatura média do ar foi de $28,04 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 4), com máxima e mínima de $36,08$ e $18,9 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. A umidade relativa média do ar foi de $73,89\%$, com valores médios da máxima e mínima de $89,73$ e $58,04\%$, respectivamente. Pode-se observar um

aumento significativo nos valores da radiação solar global, atingindo valores de $37,82 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ com média de $23,79 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A quantidade de água recebida via precipitação pluvial ao longo do período foi de $1773,32 \text{ mm}$, valor abaixo da média histórica $2263,4 \text{ mm ano}^{-1}$ (INMET, 2018).

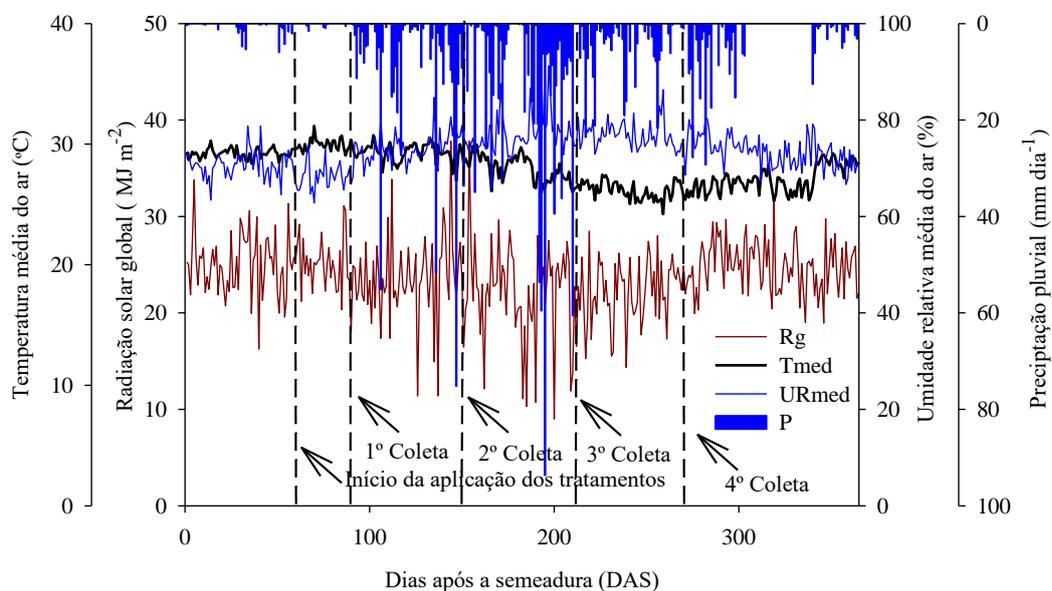


Figura 5. Variáveis meteorológicas ao longo de um ano de cultivo da cana-de-açúcar RB 92579.

2.10 Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade, homocedasticidade, análise de variância (ANAVA) pelo teste F ($p < 0,05$). Em seguida, os efeitos significativos foram comparados mediante análise de regressão visando ajustar modelos de comportamento. Os modelos de regressão selecionados tiveram como base em sua significância ao teste F ($p < 0,05$) e valor do coeficiente de determinação (R^2). Para todas as análises foi utilizado o software estatístico SISVAR versão 5.2 (FERREIRA, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Trocas gasosas e Fotossíntese

Na Tabela 2, pode-se verificar o resumo da análise de variância para as variáveis fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (g_{sw}), CO_2 intracelular (C_i), Temperatura Foliar (T_{Leaf}). As avaliações foram realizadas em intervalos de 60 dias, iniciando aos 90 dias após a semeadura (DAS) até 210 DAS, entre os meses de fevereiro e agosto de 2017.

Tabela 2. Resumo da análise de variância das variáveis fotossíntese (A), condutância estomática (g_{sw}), CO_2 intracelular (Ci) e Temperatura Foliar (T_{Leaf}) na cana-de-açúcar RB 92579 (Cana planta) irrigada com diferentes níveis de salinidade e lâminas de lixiviação em Recife, PE

F.V	GL	Quadrado médio				
		A	g_{sw}	E	Ci	T_{Leaf}
90 DAS						
CEa	4	57,15**	0,051**	144,70**	270,60**	5,23**
Reg. Linear	1	177,31**	0,129**	405,60**	1044,44**	20,19**
Lâmina (L)	1	153,7**	0,035**	110,1**	1516,7**	15,04**
CEa x L	4	4,56**	0,00086*	5,40 ^{ns}	70,80 ^{ns}	0,64 ^{ns}
Resíduo	30	0,920	0,00029	3,59	63,75	0,78
CV (%)	-	5,69	6,60	11,15	12,41	2,30
150 DAS						
CEa	4	65,66**	0,21**	13,32**	8293,41**	11,40**
Reg. Linear	1	191,53**	0,081**	49,93**	30912,40**	43,33**
Lâmina (L)	1	64,51**	0,20**	30,67**	20524,52**	48,33**
CEa x L	4	3,03 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,400 ^{ns}	1662,61**	0,86 ^{ns}
Resíduo	30	2,57	0,0001	17,03	167,21	0,53
CV (%)	-	10,21	14,98	12,60	6,69	1,94
210 DAS						
CEa	4	68,90**	0,009**	3,78**	9302,40**	0,878 ^{ns}
Reg. Linear	1	268,53**	0,037**	14,98**	35701,60**	2,12*
Lâmina (L)	1	117,64**	0,017**	24,93**	19591,20**	8,93**
CEa x L	4	1,79 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,183 ^{ns}	110,33 ^{ns}	0,028 ^{ns}
Resíduo	30	1,67	0,006	4,00	195,36	0,496
CV (%)	-	9,58	9,29	8,84	7,11	1,97

*, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo pelo teste F; GL - Grau de liberdade; CV - Coeficiente de variação

Observou-se que aos 90 DAS houve efeito da interação da salinidade e as lâminas de lixiviação para as variáveis fotossíntese (A) ($p < 0,01$) e condutância estomática (g_{sw}) ($p < 0,05$). Para a transpiração (E), carbono interno (Ci) e temperatura foliar (T_{Leaf}) houve efeito significativo ($p < 0,01$) para os efeitos isolados (salinidade e lâminas de lixiviação).

Aos 150 DAS, verifica-se que houve efeito significativo ($p < 0,01$) da interação salinidade x lâminas de lixiviação apenas para concentração interna de CO_2 intracelular (Ci). Para fotossíntese (A), condutância estomática (g_{sw}), transpiração (E) e temperatura da foliar (T_{Leaf}) houve efeito isolado da salinidade e das lâminas de lixiviação ($p < 0,01$).

Aos 210 DAS, observou-se houve efeito significativo ($p < 0,01$) para a interação salinidade x lâmina de lixiviação para fotossíntese (A), condutância estomática (g_{sw}), transpiração (E), concentração interna de CO_2 (Ci), apresentaram significância ($p < 0,01$)

para os fatores isolados. A temperatura foliar (T_{Leaf}) apresentou efeito significativo ($p < 0,01$) apenas para as lâminas de lixiviação.

3.1.1 Fotossíntese (A)

Na Figura 6 A, observa-se a interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação e lâminas de lixiviação para fotossíntese (aos 90 DAS). Houve um decréscimo da fotossíntese em função do incremento da salinidade da água de irrigação, com efeito significativo ($p < 0,01$) linear decrescente para as duas lâminas de lixiviação (100% e 120% ETc).

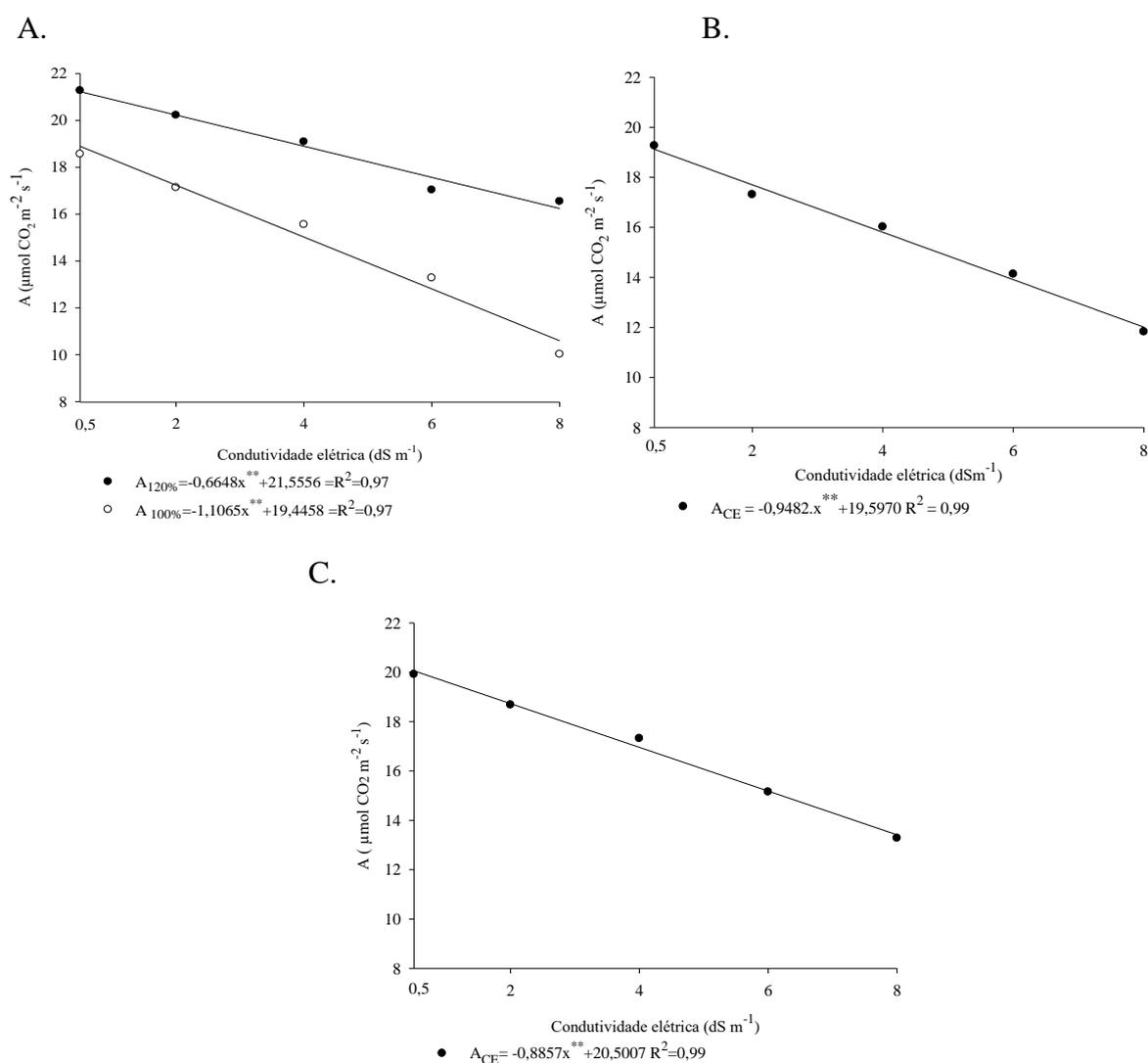


Figura 6. Fotossíntese da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.

Para o menor valor de salinidade ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$) observa-se os maiores valores da fotossíntese. Para a lâmina de 100% da ETc os valores médios observados para essa variável foram $18,56$ e $10,02 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para as salinidades de $0,5$ e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente, uma redução percentual de $45,9\%$.

Na lâmina de 120% da ETc observa-se os valores de $21,27$ e $16,54 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para os níveis de salinidade de $0,5$ e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente, redução percentual de $22,1\%$, demonstrando uma maior eficiência da lâmina de lixiviação ($0,17$) na redução da intensidade de estresse salino.

Comumente, a atividade fotossintética das plantas é afetada pela salinidade devido a fatores como a desidratação de membranas celulares que reduzem a permeabilidade ao CO_2 , toxicidade de sal, menor fornecimento de CO_2 devido à redução da atividade de água nos estomas, senescência induzida pela salinidade, mudanças na atividade enzimática induzidas por mudanças na estrutura do citoplasma, e feedback negativo por redução da atividade dos pigmentos fotossintéticos (IYENGAR & REDDY, 1996; TAIZ & ZEIGER, 2013; RASOULI & KIANI-POUYA de 2015).

Aos 150 DAS (Figura 6 B) observa-se um efeito significativo isolado para o fator salinidade, com resposta linear decrescente ($p < 0,01$). Quando comparada com a coleta anterior (90 DAS), nota-se que os valores de fotossíntese são menores, principalmente devido ao acúmulo de sais nos lisímetros que promoveram uma maior intensificação do estresse com a sua duração, promovendo valores na ordem de $19,26$ e $11,82 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($-38,62\%$) para os níveis de salinidade de $0,5$ e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente. De acordo com Targino et al. (2017) plantas cultivadas em solo salino apresentam reduzida taxa fotossintética, devido aos efeitos causados pelo aumento do potencial osmótico dos sais no solo e nas células das plantas após a sua absorção. Assim, é possível destacar a baixa disponibilidade de CO_2 para a produção de açúcar, baixa eficiência da fase fotoquímica da fotossíntese e baixa capacidade energética para realizar várias reações (produção de ATP) ligadas ao processo da fotossíntese.

Aos 210 DAS (Figura 6 C), também ocorreu o efeito isolado da salinidade apresentando uma redução linear ($p < 0,01$) nos valores de fotossíntese. Porém, essa redução ocorreu com menor intensidade que a coleta anterior (150 DAS), devido a ocorrência de chuvas neste período como demonstrado na Figura 4, assim possibilitando uma maior lixiviação dos sais da zona radicular das plantas de cana-de-açúcar. Os valores para as condutividades elétricas de $0,5$ e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$ são $19,91$ e $13,28 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente, correspondendo a uma redução percentual de $33,3\%$ com o aumento da salinidade. Em estudos realizados por Souto Filho et al. (2014), em Campina

Grande - PB, avaliando o efeito de cinco níveis de salinidade da água de irrigação (0,6; 1,6; 2,6; 3,6 e 4,6 dS m⁻¹) em duas variedades de cana-de-açúcar (SP 813250 e a RB 92579), observaram resultados similares ao descrito neste trabalho, onde o comportamento da fotossíntese apresentou uma redução linear ao longo do período de estresse.

Na Figura 7 A, observa-se o efeito isolado das lâminas de irrigação (com e sem fração de lixiviação) sobre a fotossíntese da cana de açúcar (150 DAS). Houve um incremento significativo ($p < 0,01$) de 15,02% quando se adotou a fração de lixiviação (0,17), com os valores de 14,43 e 16,98 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ correspondentes as lâminas de 100% e 120% da ET_c, respectivamente. A fração de lixiviação proporcionou uma maior retirada dos sais da zona do sistema radicular das plantas, os quais foram lixiviados na solução drenada dos lisímetros referentes a este tratamento, reduzindo a intensidade do estresse salino.

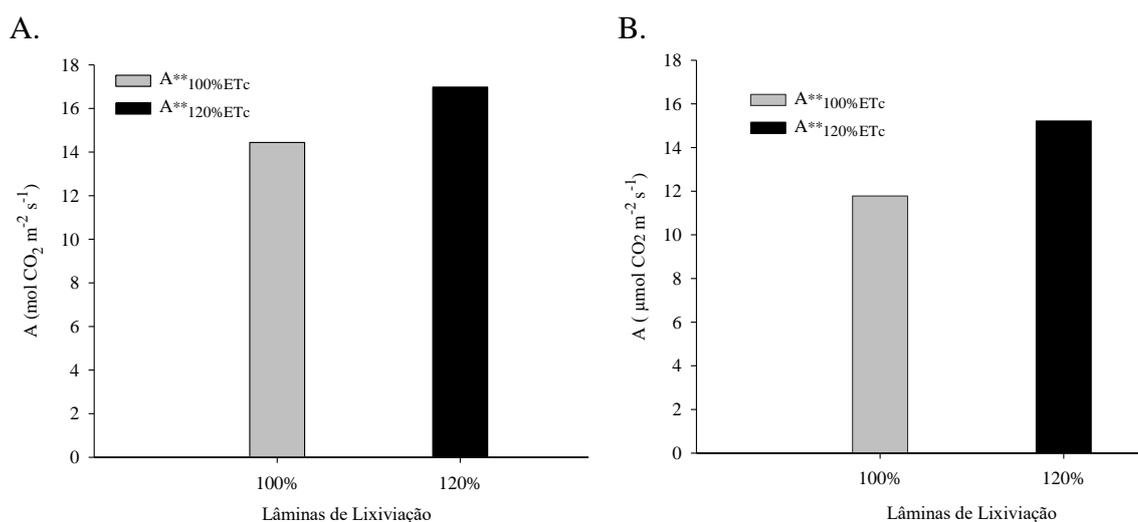


Figura 7. Fotossíntese da cana-de-açúcar (RB92579) submetida a lâminas de irrigação (com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A) e 210 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Apesar da redução da taxa fotossintética nos dois casos, a adoção da fração de lixiviação associada a um eficiente sistema de drenagem promoveu resultados satisfatórios, demonstrando a relevância da adoção deste tipo de técnica de manejo (PUGA et al., 2016).

Aos 210 DAS (Figura 7 B), o comportamento foi similar ao observado aos 150 DAS, no entanto, valores menores devido a cultura estar iniciando sua fase de maturação.

Nobel (1991) estabelece que plantas de metabolismo C4, quando cultivadas sob condições edafoclimáticas favoráveis (temperaturas amenas, incidência luminosa adequada, disponibilidade de água e nutrientes) e encontram-se fitossanitariamente sadias apresentam taxa fotossintética média equivalente a $17,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Para Larcher (2004) baseado em uma compilação de diversos trabalhos, a fotossíntese líquida em gramíneas C4 pode abranger uma faixa ainda maior (15 a $60 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) quando submetida a condições ótimas de cultivo.

3.1.2 Condutância estomática (g_{sw})

Na Figura 8 A, observa-se a interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação (aos 90 DAS) e lâminas de irrigação (com e sem lixiviação) para condutância estomática. Houve um decréscimo da condutância à medida que se incrementou a quantidade de sais no solo, com efeito linear decrescente ($p < 0,01$) para as duas lâminas de lixiviação (100% e 120% ETc).

A lâmina de 120% da ETc apresentou valores médios de 0,37 e 0,20 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m^{-1} , respectivamente, ou seja, um decréscimo percentual de 45,9%. Para a lâmina de 100% da ETc a redução percentual foi de 64,70%, apresentando valores médios de 0,34 e 0,12 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para os respectivos níveis de salinidade da água de irrigação. Silva et al. (2011) em estudos com pinhão-manso observaram uma diminuição da condutância estomática, e conseqüentemente, a diminuição de todos os parâmetros relacionados a fotossíntese.

Aos 150 DAS (Figura 8 B) observa-se efeito isolado da salinidade de forma linear decrescente ($p < 0,01$). De modo geral, quando comparada com a coleta anterior (90 DAS) nota-se menores valores da condutância estomática, devido principalmente a maior duração do tempo de exposição ao estresse causado pelo acúmulo de sais nos lisímetro.

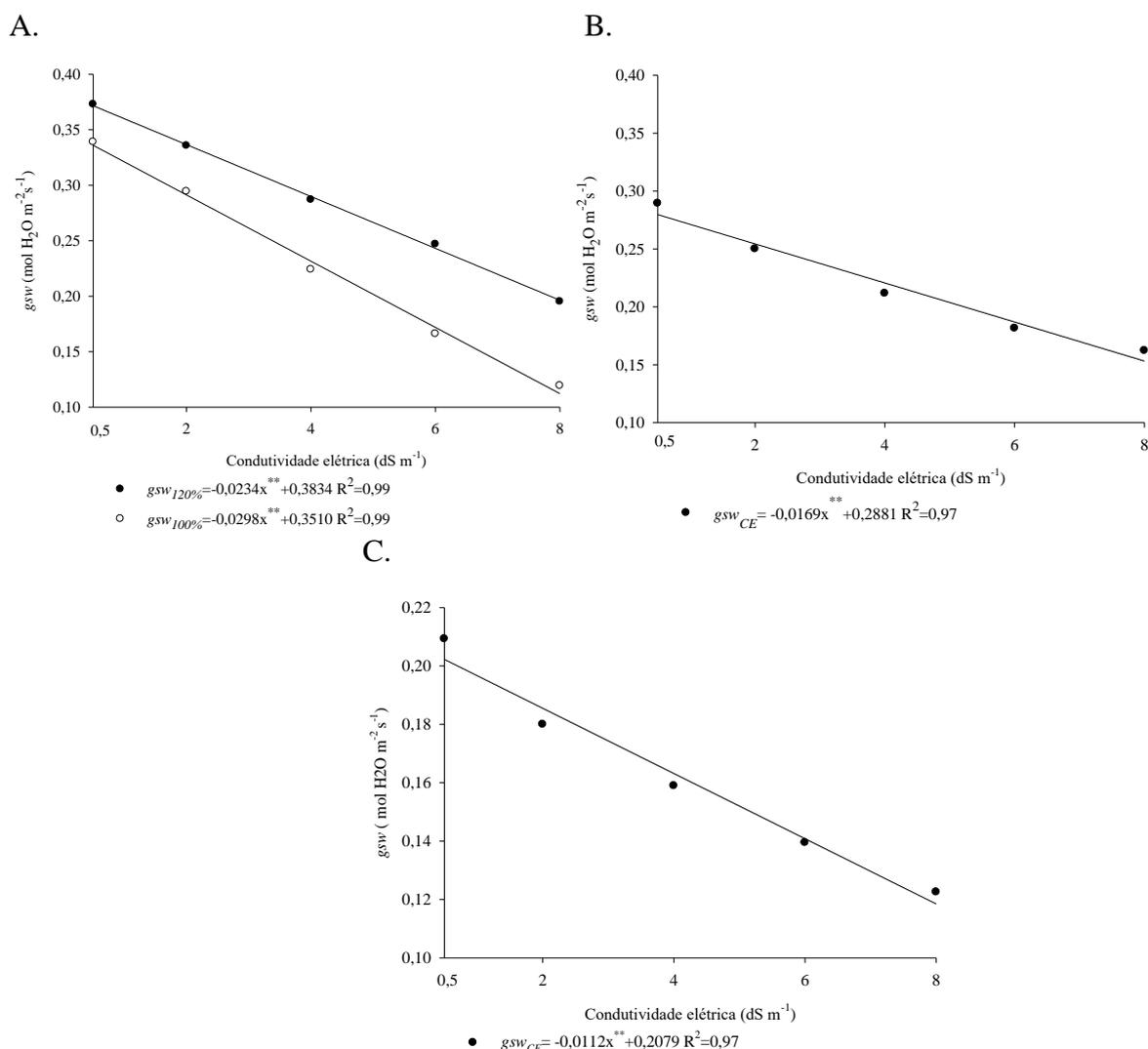


Figura 8. Condutância estomática da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C) *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.

Aos 210 DAS (Figura 8 C), também verificou-se efeito isolado da salinidade apresentando uma redução linear ($p < 0,01$) da condutância estomática, porém com maior intensidade que a coleta anterior (150 DAS). Os valores para as condutividades elétricas de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹ são 0,21 e 0,12 H₂O m⁻² s⁻¹, respectivamente. Para a mesma variedade, Souto Filho et al. (2014) observou resultados bem abaixo aos 210 DAS, sendo 0,09 e 0,07 H₂O m⁻² s⁻¹ para os níveis salinos de 0,6 e 4,6 dS m⁻¹.

Na Figura 9 A, observa-se o efeito isolado das lâminas de lixiviação (150 DAS) para a condutância estomática, apresentando os valores de 0,15 e 0,29 H₂O m⁻² s⁻¹ correspondendo as lamina de 100% e 120% ETC, respectivamente, um aumento percentual de 48,28%. Medeiros et al. (2010) relatam ser necessário um manejo cuidadoso

da aplicação de águas salinizadas, devendo-se usar lâminas excedentes, para lixiviação dos sais do solo, resultando, assim, num equilíbrio favorável dos íons na zona radicular da cultura.

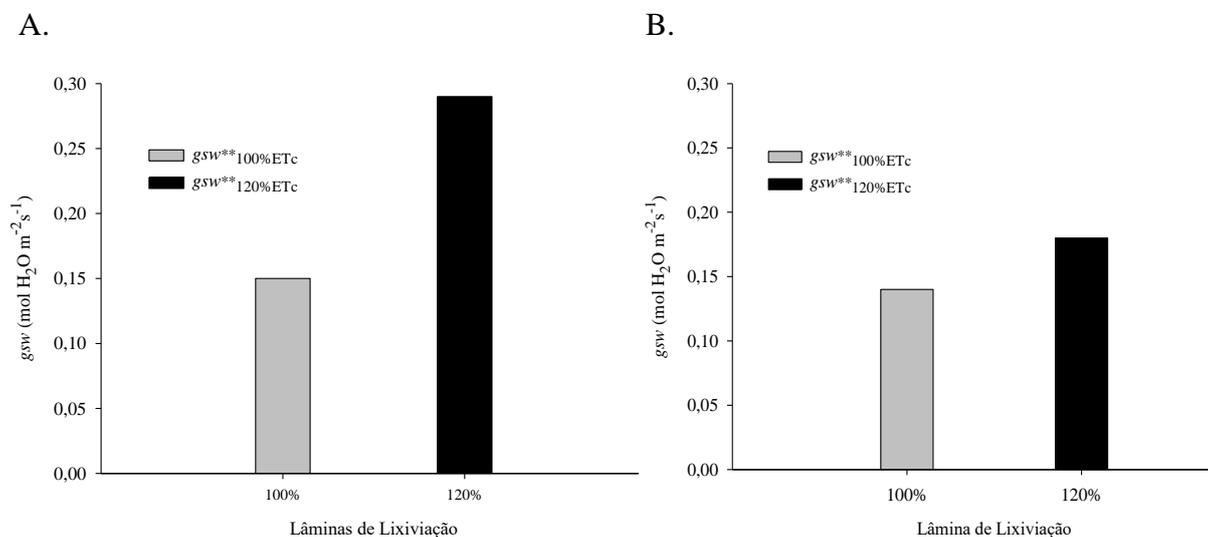


Figura 9. Condutância estomática da cana-de-açúcar (RB92579) submetida a lâminas de irrigação (com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE., aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C)*, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

De acordo com Geissler et al. (2009) as reduções das taxas fotossintéticas em virtude do aumento da salinidade ocorrem em consequência do fechamento dos estômatos, levando a uma redução substancial na difusão de CO₂ para os sítios de carboxilação. Esta interpretação é apoiada pelo efeito linear decrescente causado pelo incremento da salinidade nas Fotossíntese líquida, A (Figuras 6) e Condutância estomática, g_{sw} (Figuras 8).

Aos 210 DAS (Figura 9 B) os valores médios foram de 0,14 e 0,18 H₂O m⁻² s⁻¹ correspondendo as lâminas de 100% e 120% ETc, respectivamente. Quando comparado com a coleta anterior (150 DAS) observa-se valores inferiores, isto ocorreu em decorrência ao início do processo de maturação fisiológica da cana-de-açúcar. A redução da condutância estomática é uma resposta ao acúmulo de sais no solo, intensificando o efeito osmótico dos íons pela redução do potencial da água no solo e consequentemente sua disponibilidade para as plantas (YORDANOV et al., 2003; INMAN-BAMBER et al., 2005). A redução da condutância torna-se um mecanismo para evitar a desidratação das folhas.

De acordo com Ferreira et al. (2017), parâmetros fisiológicos como a condutância estomática e a fotossíntese podem ser utilizados como indicadores da tolerância das culturas a estresses abióticos por estarem diretamente ligados a produção de compostos orgânicos.

3.1.3 Transpiração (*E*)

Na Figura 10 A, observa-se o efeito isolado da condutividade elétrica da água de irrigação (90 DAS) para transpiração. Houve decréscimo ($p < 0,01$) da transpiração com incremento da salinidade da água de irrigação. Os valores médios para esta variável foram de 22,38 e 11,51 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m^{-1} , respectivamente, o que representa uma redução de 48,57%. Nesta coleta, foram observados os maiores valores de transpiração, principalmente devido a fase de crescimento inicial da cultura, que de acordo com Gonçalves et al. (2010), nessa fase a cana-de-açúcar apresenta tamanho e número de folhas reduzido e dessa forma a radiação incidente sobre elas é maior, elevando a temperatura e impulsionando a maiores taxas transpiratórias para o resfriamento da planta. Por ser uma cultura C4, caracteriza-se por apresentar uma maior eficiência na abertura dos estômatos, em condições de estresse (TAIZ & ZEIGER, 2013).

Aos 150 DAS (Figura 10 B) também houve efeito linear decrescente ($p < 0,01$), no entanto, nota-se menor magnitude nos valores da transpiração, que pode estar associado a um maior número folhas, assim reduzindo a incidência direta da radiação solar e também devido ao acúmulo de sais nos lisímetros que intensificaram os efeitos do estresse devido a sua duração de exposição das plantas e também pelo decréscimo ocorrido na condutância estomática e fotossíntese como observou-se anteriormente. Os valores médios para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m^{-1} foram 7,89 e 4,69 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, correspondendo a uma redução de 40,55%.

A transpiração possui uma relação direta com a condutância estomática como demonstrado em estudo realizado por Machado et al. (2009) que avaliando o efeito do déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas, observou que a redução da condutância estomática também causou uma redução da transpiração.

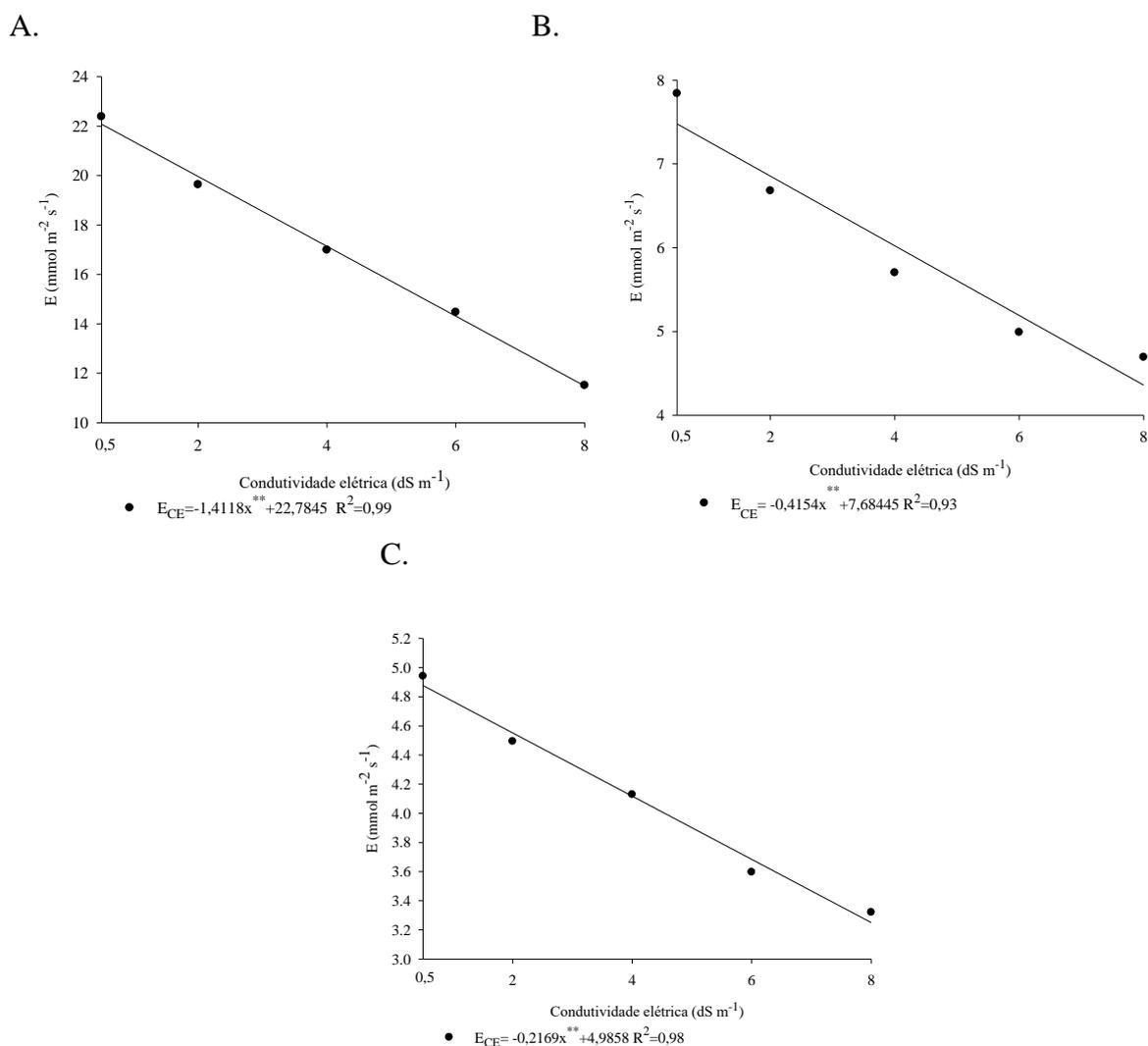


Figura 10. Transpiração (E) da cana-de-açúcar (RB92579) submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C) *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.

Aos 210 DAS (Figura 10 C) verifica-se uma maior intensificação do efeito dos níveis de salinidade decorrente do maior tempo de exposição do estresse. Os valores médios de transpiração obtidos para as condutividades elétricas de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹ foram de 4,94 e 3,32 mmol m⁻² s⁻¹ (-33,79%), respectivamente. Souto Filho et al. (2014) encontraram valores ainda mais baixos avaliando a variedade RB 92579 aos 210 DAP, com valores médios de 1,44 e 1,09 mol m⁻² s⁻¹ nos níveis de salinidade da água de irrigação de 0,6 e 4,6 dS m⁻¹.

O estresse salino tem efeitos em diversos processos fisiológicos das plantas, geralmente aumentando a resistência estomática, reduzindo a transpiração e

consequentemente o suprimento de CO₂ para a realização do processo de fotossíntese (TAIZ & ZEIGER, 2013; TARGINO et al.; 2017).

O fechamento dos estômatos é a primeira linha de defesa da planta para enfrentar estresses severos promovidos pela deficiência hídrica ou efeito dos sais no solo, pois este mecanismo restringe a perda de água por meio da transpiração e queda na assimilação de CO₂ para manutenção do estado hídrico (MAGALHÃES FILHO et al., 2008).

Na figura 11 A, observa-se o efeito isolado das lâminas de lixiviação para a transpiração aos 90DAS apresentando os valores de 15,34 e 18,65 mmol m⁻² s⁻¹ correspondentes as lâminas de 100% e 120% ETc, respectivamente, promovendo um incremento de 17,78%.

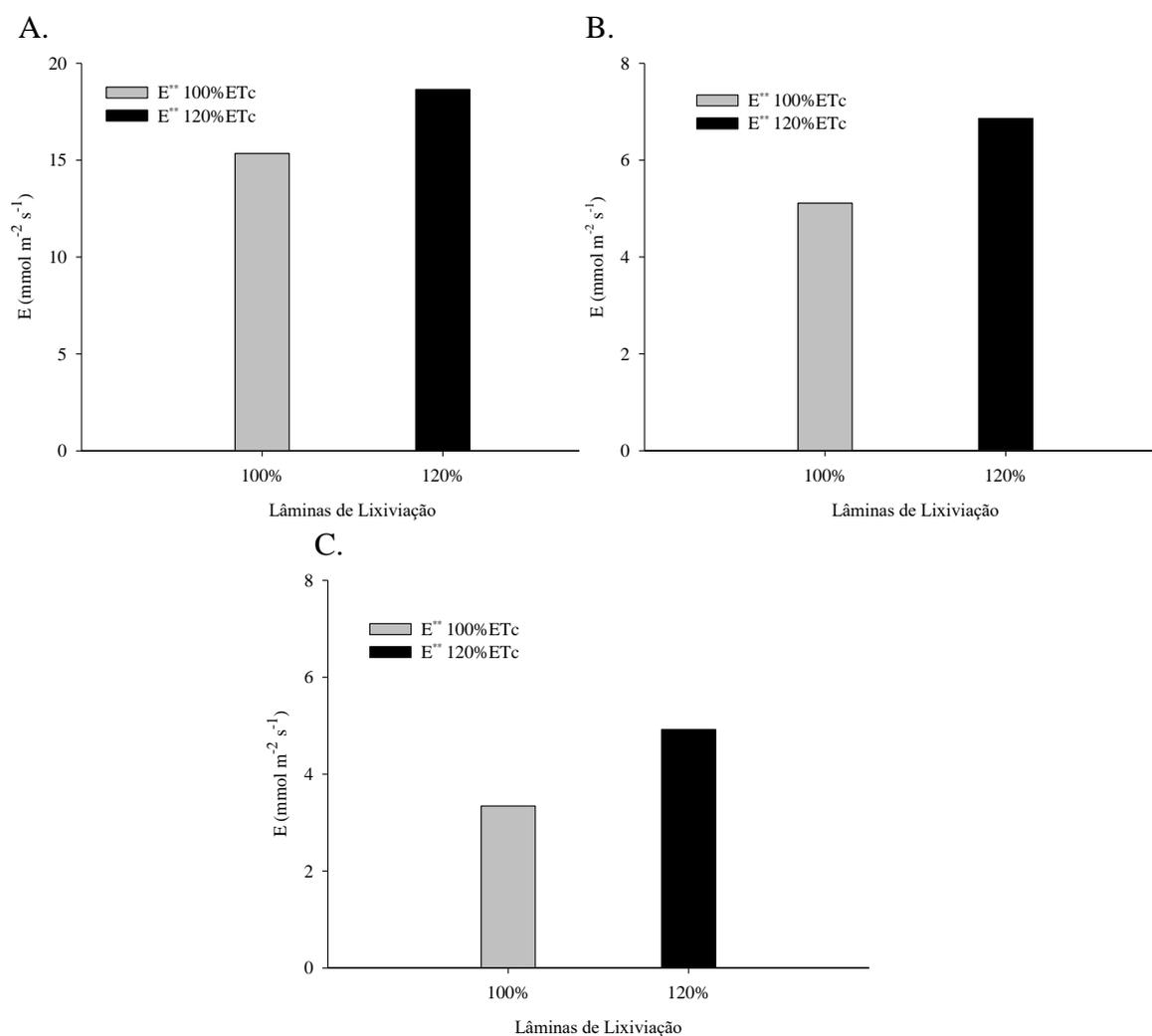


Figura 11. Transpiração da cana-de-açúcar (RB92579) submetida a lâminas de irrigação (com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

As altas taxas fotossintéticas nessa data, possivelmente está relacionado ao crescimento inicial como relatado por Gonçalves et al. (2010). Aos 150 DAS (Figura 11 B) os valores reduziram a magnitude para as lâminas de 100% e 120% ETc com médias de 5,11 e 6,86 mmol m⁻² s⁻¹ (+25,71%). Aos 210 DAS (Figura 10 C) os valores reduziram a magnitude para as lâminas de 100% e 120% ETc com médias de 3,34 e 4,92 mmol m⁻² s⁻¹ (+32,11%).

Além do fechamento estomático como forma de reduzir a perda de água por transpiração, em condições de estresse salino as plantas podem utilizar como mecanismo de defesa decréscimos na sua área foliar através da senescência foliar como o propósito de reduzir perdas por transpiração (TAIZ & ZEIGER, 2013).

3.1.4 Concentração interna de CO₂ (Ci)

Na Figura 12 A, observa-se o efeito isolado da condutividade elétrica da água de irrigação (aos 90 DAS) e para a concentração interna de CO₂. Houve decréscimo linear ($p < 0,01$) na concentração de CO₂ à medida que se incrementou a quantidade de sais no solo. Os valores médios observados para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹ foram 70,71 e 57,85 μmol CO₂ ar mol⁻¹, respectivamente, ou seja, uma redução percentual de 18,19%.

Souto Filho et al. (2014) observaram reduções percentuais de 65,9% aos 120 DAP, entre os valores extremos dos níveis de salinidade da água de irrigação avaliados (0,6 e 4,6 dS m⁻¹) para a variedade do presente estudo.

Os valores reduzidos da concentração de CO₂ para esta data, estão relacionados fase fenológica da cultura, uma vez que no crescimento inicial a planta necessita de grandes quantidades de compostos orgânicos para produzir novas folhas e promover perfilhamento. De acordo com Taiz & Zeiger (2013) baixos valores de *Ci* é sinal de elevado fluxo do processo fotossintético, sendo portanto, o carbono reduzido a compostos orgânicos, corroborando com os altos valores de fotossíntese apresentados anteriormente aos 90 DAS.

Aos 150 DAS (Figura 12 B) observa-se a interação da salinidade com as lâminas de lixiviação com efeito linear decrescente ($p < 0,01$). Os valores médios para lâmina de 120% da ETc para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹ são de 241,89 e 191,06 μmol CO₂ ar mol⁻¹ (-21,01%), respectivamente. A redução percentual para a lâmina de 100% da ETc (sem lixiviação) foi de 49,38% com valores médios de 227,87 e 115,34 μmol CO₂ ar mol⁻¹ para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹.

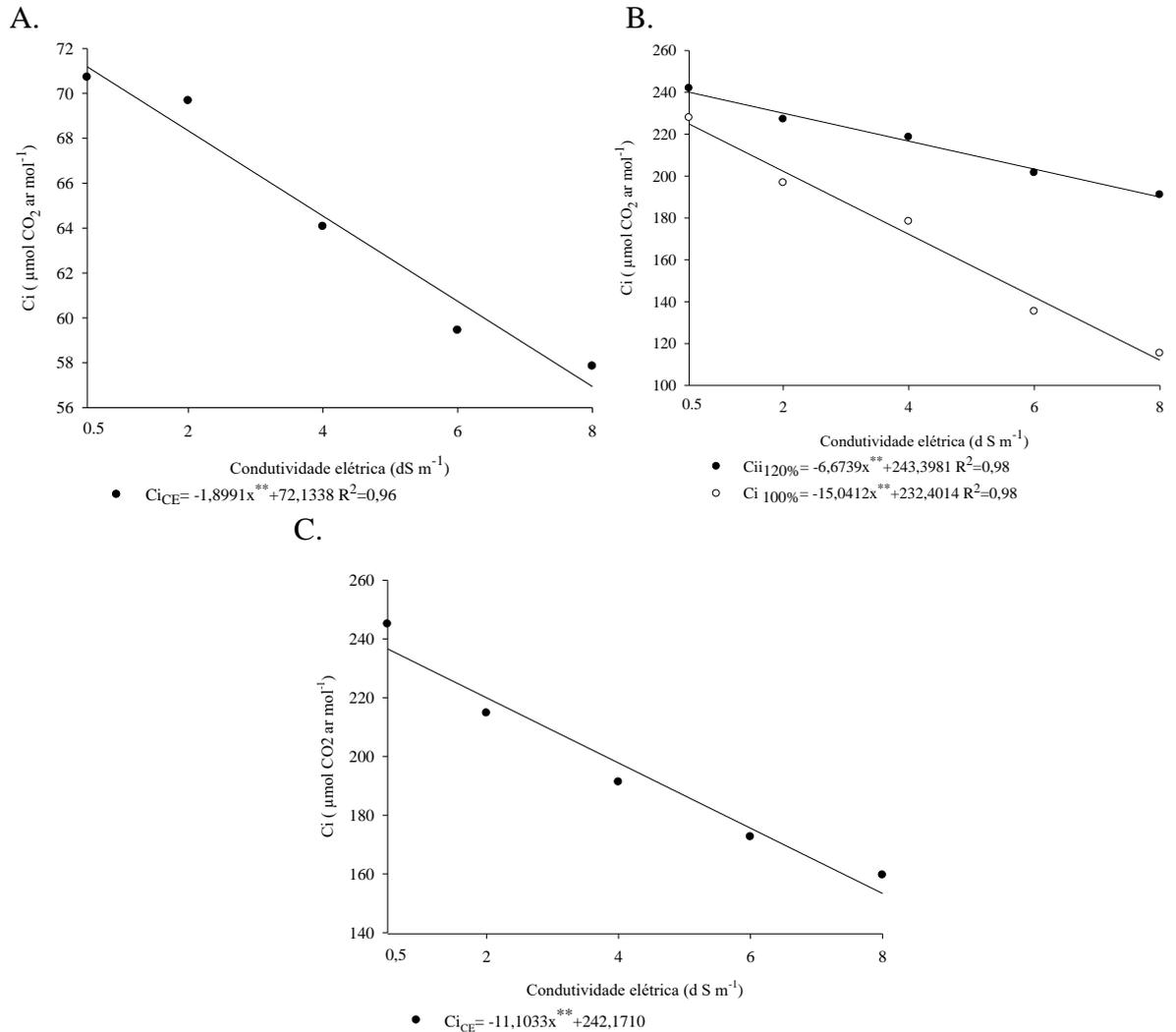


Figura 12. Concentração interna de CO_2 (C_i) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.

Aos 210 DAS (Figura 12 C), observa-se o efeito isolado da salinidade com redução linear ($p < 0,01$) na concentração interna de CO_2 . Os valores médios observados para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m^{-1} foram 245,06 e 159,59 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ ar mol}^{-1}$, respectivamente, ou seja, uma redução percentual de 34,87%.

Segundo Lucena (2009), as elevações na C_i do tecido foliar podem estar associadas à queda na atividade de enzimas do metabolismo do carbono, em razão da sensibilidade à acumulação de Na^+ e Cl^- nas folhas, resultando em fitotoxicidade. Reduções de até 65,91% foram observadas por Souto Filho et al. (2014) para a mesma variedade com níveis de salinidade até 4,6 dS m^{-1} .

Na Figura 13 A, observa-se o efeito isolado das lâminas de lixiviação para a concentração de CO₂ aos 90 DAS apresentando os valores médios de 58,20 e 70,50 μmol CO₂ ar mol⁻¹, correspondendo as lâminas de 100% e 120% da ETc, respectivamente. A fração de lixiviação (0,17) correspondente a lâmina de irrigação de 120% da ETc promoveu incremento de 17,45% na Concentração interna de CO₂, principalmente devido a maior abertura estomática como observado nos resultados de fotossíntese, condutância estomática e transpiração.

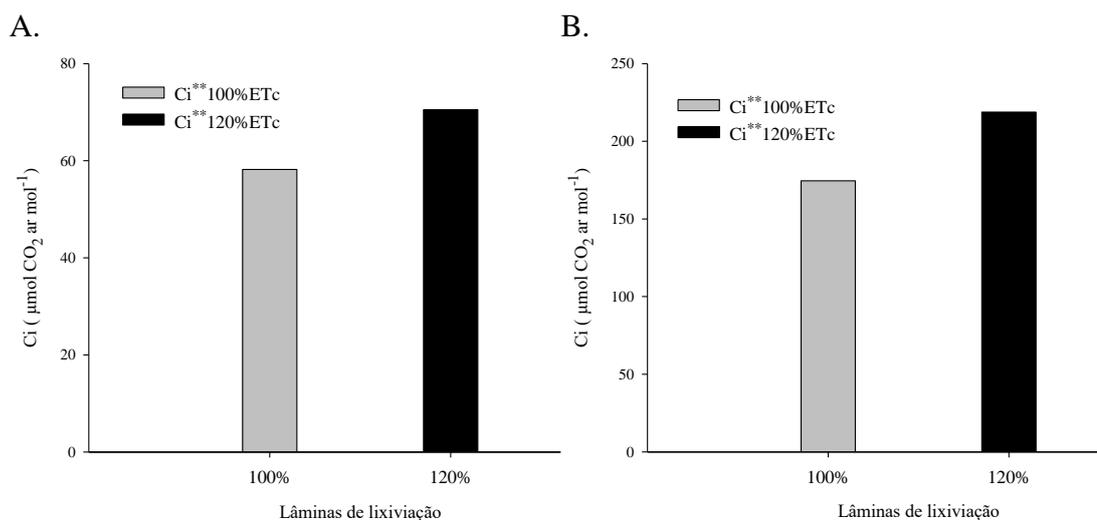


Figura 13. Concentração interna de CO₂ (*C_i*) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a lâminas de irrigação (com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 210 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Aos 210 DAS (Figura 13 B) os valores médios foram de 174,52 e 218,78 μmol CO₂ ar mol⁻¹ correspondendo as lâminas de 100% e 120% da ETc, respectivamente. Como já relatado anteriormente, a importância do manejo da irrigação com águas salinizadas por meio do uso da fração de lixiviação é destacada por Medeiros et al. (2010), uma vez que a mesma promove um equilíbrio dos sais na zona radicular da cultura. A justificativa é corroborada com os dados obtidos no presente trabalho onde a lâmina de 120% ETc promoveu um incremento percentual de 20,23% na *C_i*.

3.1.5 Temperatura foliar (*T_{Leaf}*)

Na Figura 14 A, observa-se o efeito isolado da condutividade elétrica da água de irrigação (aos 90 DAS) para a temperatura foliar. Houve aumento da temperatura à medida que se incrementou a quantidade de sais no solo, com efeito linear crescente ($p <$

0,01). Os valores médios de temperatura foliar observados foram de 37,38 e 39,41 °C para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, ou seja, um incremento de 2,03 °C (+5,4%).

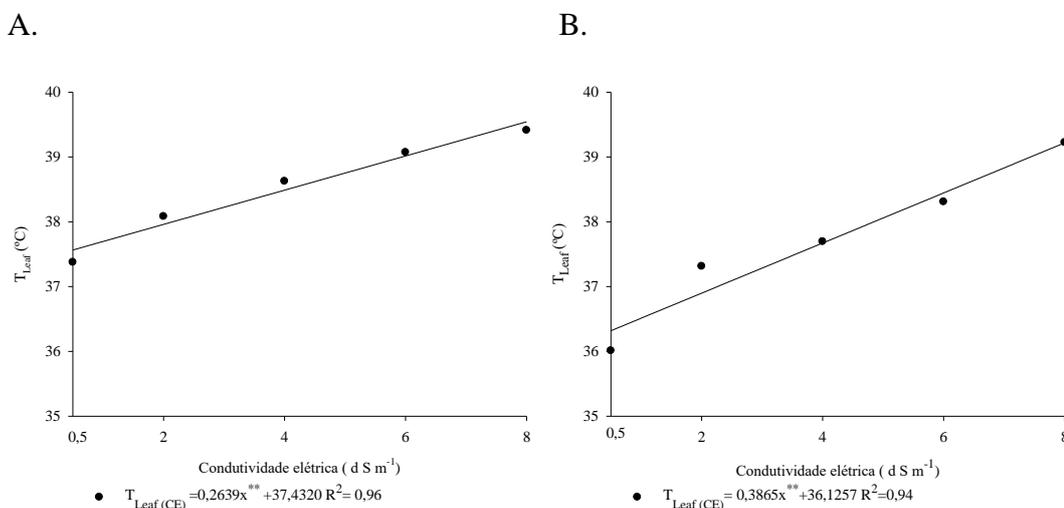


Figura 14. Temperatura foliar (T_{Leaf}) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.

Aos 150 DAS (Figura 14 B) também observou-se efeito linear crescente ($p < 0,01$). Nota-se que os valores da temperatura foliar são menores, principalmente devido aumento da umidade relativa do ar que promoveu precipitações e, conseqüentemente redução da temperatura do ar no período, os valores médios para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹ foram de 36,01 e 39,22 °C (+8,18%), respectivamente. As plantas C4 quando comparadas com as C3, além do número de moléculas de carbono, apresentam maior habilidade em tolerar condições de alta temperatura e intensa radiação solar.

De acordo com Pellegrino; Assad & Marin (2007) os organismos C4 apresentam características fisiológicas e anatômicas para sobreviver em ambientes de maior temperatura como: uma estrutura conhecida como “anatomia Kranz” camada de células clorofiladas e fotossintetizantes que possuem grande afinidade por dióxido de carbono. Targino et al. (2017) ao avaliar os efeitos do crescimento e desenvolvimento de três variedades de cana-de-açúcar (VAT 90212, RB 92579 e SP 7910111) em solos salino (4,6 dS m⁻¹) e não salino (1,5 dS m⁻¹), constatou maiores temperaturas foliares nas plantas sob estresse salino. Os autores atribuem esse aumento a redução da condutância estomática e da transpiração. De acordo com Taiz & Zeiger (2013) a transpiração

desempenha papel importante na regulação da temperatura foliar, impedindo que esta atinja níveis letais para as plantas.

Na Figura 15 A, observa-se o efeito isolado das lâminas de lixiviação para temperatura foliar aos 90 DAS com valores médios de 39,13 e 37,9 °C, correspondendo as lâminas de 100% e 120% ETc, respectivamente. A lâmina de 120% da ETc mostrou-se mais eficiente em reduzir a temperatura da folha em 1,23 °C, correspondendo a 3,14%.

Aos 150 DAS (Figura 15 B) os valores médios para as respectivas lâminas foram 38,81 e 36,61 °C (-5,66%). Nesse período, fatores climáticos também contribuem para redução nos valores de temperatura foliar, como a ocorrência de precipitações (Figura 4).

Aos 210 DAS (Figura 15 C) observa-se os valores de 36,25 e 35,31°C (-2,59%) correspondendo as lâminas de 100% e 120% ETc, respectivamente.

Esses resultados corroboram com os de Vieira et al. (2014) em estudo com a cana-de-açúcar, cultivar RB 867515 submetida a diferentes lâminas de irrigação (25, 50, 75, 100, 125 e 150% da ETc) em que plantas mantidas sob adequado fornecimento hídrico apresentaram temperaturas da folha inferiores, de até 6,54 °C, quando comparadas as plantas sob déficit hídrico.

Segundo Lobo et al. (2004) a temperatura foliar pode ser utilizada como ferramenta no manejo da irrigação, como indicador das condições hídricas da cultura, no entanto, é necessário que se estabeleça índices de estresse hídrico, que determinem o momento e a lâmina de irrigação para cada condição de cultivo.

De forma geral pode-se admitir que a cana-de-açúcar apresente uma redução no seu crescimento quando a temperatura do ar encontra-se de 20°C e inversamente em taxas máximas de temperatura entre 30°C e 34°C, apresentando-se em estresse térmico em temperaturas acima de 35°C, com crescimento praticamente inexistente, acima dos 38°C. A cana-de-açúcar ainda possui um crescimento nulo ou estacionado quando a temperatura do ar é inferior a valores entre 16°C e 18°C (BARBIERI & VILLA NOVA, 1977; DOOREMBOS & KASSAN, 1979; MAGALHÃES, 1987).

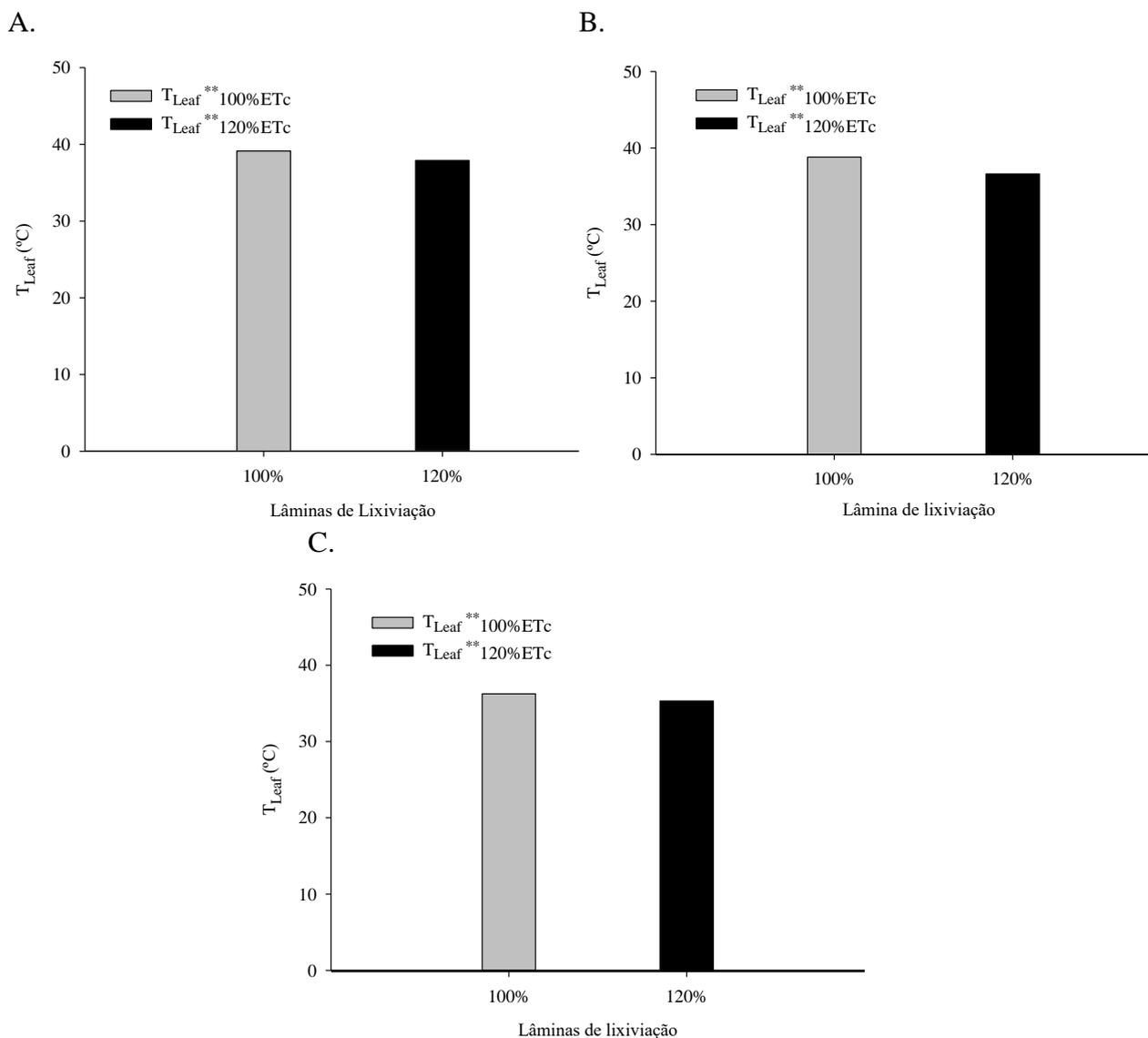


Figura 15. Temperatura foliar (T_{Leaf}) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a lâminas de irrigação (Com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A), 150 DAS (B) e 210 DAS (C). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

4. CONCLUSÕES

O aumento de sais no solo devido ao incremento dos níveis das soluções salinas, promove redução do potencial osmótico do solo, ocasionando uma diminuição da absorção de água pela planta e, conseqüentemente da transpiração, que se intensifica em razão de uma menor condutância estomática, interferindo diretamente na absorção de CO_2 e no processo fotossintético.

A temperatura foliar apresentou uma redução na lâmina de 120% que quando comparada com a lâmina de 100% chegou a uma diferença de 2,03 °C, demonstrando a

eficiência da lâmina de lixiviação em reduzir os efeitos do estresse sobre a planta. A redução da temperatura também está relacionada com os valores maiores apresentados pelas variáveis: transpiração e condutância estomática, que possuem relação direta com a termorregulação da planta.

A fração de lixiviação de 0,17 apresentou a capacidade de reduzir os efeitos deletérios dos sais sobre as trocas gasosas (A , E , g_{sw} , C_i e T_{Leaf}).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2014.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. In: PLANALSUCAR, COORDENADORIA REGIONAL SUL. COSUL. Araras. 1977. p.1-22.

BARROS, A. H. C. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica: Árvore do conhecimento: Território Mata Sul Pernambucana - Clima**. Disponível: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000fbz2ztdp02wx5eo0sawqe3h68l5n4.html. Acesso em: 03/10/2016.

CAVALCANTE, F. J. A. et al. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2.ed. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco, 2008. 198p.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; ABREU, H. M. C.; ARRUDA, P. et al. Sugarcane (*Saccharum officinarum*): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, n.4, p.62-89, 2011.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v.5 - Safra 2018/2019, n.1 - Primeiro Levantamento**. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 08/06/2018.

COSTA SOBRINHO, A. F. **Análise de cenários da salinização dos aquíferos costeiros da planície do Recife levando em conta os efeitos da elevação do nível do mar**. 2014. 229p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

CUSTÓDIO, E. Coastal aquifers of Europe: an overview. **Hydrogeology Journal**, v.18, p.269-280, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (Irrigation and drainage paper, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144p. (Irrigation and drainage paper, 24).

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FERREIRA, F. **Avaliação dos Impactes das Alterações Climáticas nos Aquíferos Costeiros do Concelho de Almada**. 2014. 89p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Faculdade de Ciências, Lisboa.

FERREIRA, H. S. T.; TUSUNADA, S. M; BASSI, D. et al. Sugarcane Water Stress Tolerance Mechanisms and its Implications on Developing Biotechnology Solutions. **Frontiers in Plant Science**, v.8, 2017.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15^a ed. Piracicaba: ESALQ, 2009. 451 p.

GONÇALVES, E. R. et al. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.378-386, 2010.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugar cane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v.92, n.4, p.185-202, 2005.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normal Climatológica do Brasil 1981-2010**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 03/06/2018.

IYENGAR, E. R. R.; REDDY, M. P. Photosynthesis in highly salttolerant plants. **In: PESSERKALI, M. (Ed.), Handbook of photosynthesis**. Marshal Dekar, Baten Rose, USA, p.897-909, 1996.

KAVI KISHOR, P. B.; SANGAM, S.; AMRUTHA, R. N. et al. Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: Its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. **Current Science**, v.88, n.3, p.424-438, 2005.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990. 649p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, v.17, p.678-684, 1974.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: RiMa, 2004. 531p.

LI-COR, Inc. **Instruction Manual: IRGA LI-6400/XT - Infrared Gas Analyser**. Lincoln, Nebraska USA. 2014. 304 p.

LIRA, R.M. **Salinidade da água de irrigação e frações de lixiviação no cultivo da cana-de-açúcar**. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, Recife, 2016.

LOBO, F. A.; OLIVA, M. A.; RESENDE, M.; LOPES, N. F.; MAESTRI, M. Infrared thermometry to schedule irrigation of common bean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.39, n.2, p.113-121, 2004.

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

MACHADO, R. S. et al. Biometric and physiological responses to water deficit in sugarcane at different phenological stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; TSUIOSHI, Y. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFOS, 1987. 249 p.

MAGALHÃES FILHO, J. R. et al. Deficiência hídrica, trocas gasosas e crescimento de raízes em laranjeiras ‘Valencia’ sobre dois tipos de portas-enxerto. **Bragantina**, 66, n.1, p.75-82, 2008.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO.
Cana-de-açúcar. Disponível em:
<<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/canade-acucar>>. Acesso em:
24/03/2018.

MEDEIROS, J. F.; NASCIMENTO, L. B.; GHEYI, H.R. Manejo do solo-água em áreas afetadas por sais. **In:** GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Ed.). Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal, 2010. p. 279-302.

MELONI, D. A.; GULOTTA, M. R.; MARTINEZ, C. A. et al. The effects of salt stress on growth, nitrate reduction and proline and glycine betaine accumulation in *Prosopis alba*. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.16, n.1, p.39-46, 2004.

MONTEIRO, J.E.B.A- **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. 530p.

MUNIR, N.; AFTAB, F. The role of polyethylene glycol (PEG) pretreatment in improving sugarcane salt (NaCl) tolerance. **Turkish journal of botany**, v.33, p.407-415, 2009.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.651-681, 2008.

NOBEL, P.S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. San Diego: Academic press, 1991. 635p.

PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; MARIN, F. R. Mudanças climáticas globais e a agricultura no Brasil. **Revista Multiciência**, n.8, p.139-162, 2007.

PRISCO, J.T.; GOMES FILHO, E. Fisiologia e bioquímica do estresse salino em plantas. **In:** GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na**

agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza, INCT Sal, 2010. Cap.10, p.143-159.

PUGA, A.P.; MELO, L.C.A.; ABREU, C.A. et al. J. Leaching and fractionation of heavy metals in mining soils amended with biochar. **Soil and Tillage Research**, v.164, p.25-33, 2016.

RASOULI, A.; KIANI-POUYA, A. Photosynthesis capacity and enzymatic defense system as bioindicators of salt tolerance in triticale genotypes. **Flora**, v.214, p. 34-43, 2015.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola.** Campina Grande: UFPB. Estudos da FAO, Irrigação e Drenagem. 2000, 117p.

SAIRAM, R.K.; TYAGI, A. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. **Current Science**, v.86, n.03, p.407-421, 2004.

SANTANA, M. J; CARVALHO, J.A; SOUZA, K.J et al. Efeitos da salinidade da água de irrigação na brotação e desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) em solos com diferentes níveis texturais. **Revista Ciência e agrotecnologia**, v.31, p.1470-1476, 2007.

SANTOS, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de classificação de solos.** 3ª ed. Brasília, DF: Embrapa,p.353,2013.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; HEMMINGSEN, E. A.; BRADSTREET, E. D. Sap pressure in vascular plants. **Science**, v.148, p.339-346, 1965.

SILVA, E. N.; RIBEIRO, R. V.; FERREIRA-SILVA, S. L.; VIÉGAS, R. A.; SILVEIRA, J. A. G. Salt stress induced damages on the photosynthesis of physic nut young plants. **Scientia Agricola**, v.68, p.62-68, 2011.

SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v.98, p.91-97, 2006.

SOUTO FILHO, L. T. et al. Efeito da salinidade nas trocas gasosas de duas cultivares de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.2, p.67-82, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 5. ed., 2013. 954p.

TARGINO, H. C. O.; SILVA, J. A. B.; SILVA, E. P.; AMORIM, M. N.; SEABRA, T. X. Soil salinization and its effects on morpho-physiological characteristics of sugarcane varieties. **Revista Geama**, v.3, n.4, p.184-190, 2017.

VIEIRA, G.H.S. et al. Indicadores morfo-fisiológicos do estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. **Bioscience Journal**, v.30, supplement 1, p.65-75, 2014.

YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant responses to drought and stress tolerance. **Journal of Plant Physiology**, p.187-206, 2003.

CAPÍTULO 3

RELACÕES HÍDRICAS EM CANA-DE-ACÚCAR SOB ESTRESSE SALINO E **LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO**

CAPÍTULO 3 – RELAÇÕES HÍDRICAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SOB ESTRESSE SALINO E LÂMINAS DE LIXIVIAÇÃO

RESUMO

O conhecimento de indicadores fisiológicos relacionados ao estado hídrico das plantas tem sido apontado como importantes para a seleção de genótipos tolerantes a condições de estresses abióticos, principalmente ocasionados pela salinidade. Objetivou-se avaliar o efeito da salinidade da água de irrigação e frações de lixiviação sobre as relações hídricas da cana-de-açúcar. A pesquisa foi conduzida na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Recife - PE. O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, compondo um esquema fatorial 5 x 2 (5 níveis de salinidade e 2 lâminas de irrigação), resultando em 10 tratamentos, com quatro repetições. Foram utilizados 40 lisímetros de drenagem, onde foi implantada a variedade 'RB 92579' em novembro de 2016 e um sistema de irrigação por gotejamento. Aos 60 dias após o plantio (DAP) iniciou-se a aplicação dos tratamentos: cinco níveis de salinidade (0,5; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 dS m⁻¹) e duas lâminas de reposição da evapotranspiração da cultura de 100% e 120% da ETc, correspondentes a fração de lixiviação de 0 e 0,17. Foram realizadas análises fisiológicas para determinação das relações hídricas (Eficiência instantânea do uso de água, eficiência intrínseca do uso de água e eficiência instantânea de carboxilação) sendo as leituras obtidas por meio do IRGA (Analisador de Gás Infravermelho). O potencial hídrico foliar (Ψ_w) foi avaliado com auxílio da câmara de pressão tipo Scholander entre as 1:00 e 5:00 da manhã. As leituras foram feitas na terceira folha +3, aos 90, 150, 210 e 270 (DAP). De modo geral, foi possível notar o aumento das eficiências do uso da água nas plantas mais estressadas demonstrando a habilidade da espécie em se adaptar as condições adversas. O potencial hídrico foliar foi influenciado de forma negativa pelos níveis salinos promovendo uma diminuição dos valores, devido ao acúmulo de sais no solo. A fração de lixiviação apresentou maior eficiência em aumentar o potencial pelo aumento do potencial osmótico do solo devido a lixiviação dos sais.

Palavras-chave: Salinidade, potencial hídrico, eficiência no uso da água, lâmina de lixiviação, RB 92579

CHAPTER 3 – WATER RELATIONS IN SUGAR CANE UNDER SALINE STRESS AND LEACHING BLADES

ABSTRACT

The knowledge of physiological indicators related to the water status of plants has been identified as important for the selection of genotypes tolerant to abiotic stress conditions, mainly caused by salinity. The objective of this study was to evaluate the effect of irrigation water salinity and leaching fractions on water relations of sugarcane. The research was conducted at the Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Campus Recife - PE. The design was completely randomized, with a 2 x 5 factorial scheme (5 levels of salinity and 2 irrigation blades), resulting in 10 treatments with four replications. 40 drainage lysimeters were used, where the variety 'RB 92579' was implanted in November 2016 and a drip irrigation system. The treatments were applied at 60 days after planting (DAP): five salinity levels (0.5; 2.0; 4.0; 6.0; 8.0; dS m⁻¹) and two slides of 100% and 120% ETC crop evapotranspiration, corresponding to the leaching fraction of 0 and 0.17. Physiological analyzes were performed to determine the water relations (Transpiration, instantaneous efficiency of water use, intrinsic efficiency of water use and instantaneous efficiency of carboxylation) and the readings obtained through IRGA (Infrared Gas Analyzer). Leaf water potential (Ψ_w) was evaluated using the Scholander pressure chamber between 1:00 and 5:00 in the morning. The readings were made on the third sheet +3, at 90, 150, 210 and 270 (DAP). In general, it was possible to note the increase in water use efficiencies in the most stressed plants, demonstrating the ability of the species to adapt to adverse conditions. The leaf water potential was negatively influenced by saline levels, promoting a decrease in the values, due to the accumulation of salts in the soil, the leaching fraction presented greater efficiency in increasing the potential by increasing the osmotic potential of the soil due to the leaching of the salts.

Key-words: Salinity, water potential, water use efficiency, leach blade, RB 92579

1. INTRODUÇÃO

À grande demanda mundial por energias limpas e de fontes renováveis, tem incentivado a busca por bioenergia e impactado em aspectos relacionados a gestão eficaz no uso da água no setor agrícola (SILVA et al., 2011). Diante deste contexto, o Brasil sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, e segundo maior produtor de etanol, apresenta-se como país de grande potencial bioenergético, impulsionando a expansão da cultura e tornando-a como uma das fontes bioenergéticas mais eficientes (MANHÃES et al., 2015; CONAB, 2018).

O clima favorável faz com que o Brasil apresente o menor custo de produção para a cana-de-açúcar, elevada produtividade, possibilidade de cogeração de energia elétrica a partir do bagaço e, flexibilidade de produção de açúcar ou etanol (WILKINSON, 2015). De acordo com a CONAB (2018) a produção na safra 2018/19 finalizou com 633,3 milhões de toneladas, com uma produtividade média de 72,54 Mg ha⁻¹, com grande contribuição das lavouras do Norte-Nordeste em função da recuperação devido à melhoria das condições climáticas.

Apesar das vantagens do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil, existem diversos riscos inerentes à atividade, destacando-se os riscos climáticos. Na região Nordeste do Brasil, principalmente nos tabuleiros costeiros, é comum a utilização da irrigação complementar para a cultura (MARIN & NASSIF, 2013). Segundo Dalri et al. (2008) a irrigação proporciona incrementos de até 58% na produtividade de cana, além de melhorias na qualidade tecnológica. Outro benefício importante é a melhoria na eficiência de uso da água (EUA), quando comparado aos sistemas de produção de sequeiro, como resultado do incremento do balanço líquido de carbono (OLIVEIRA, et al., 2011).

A cana-de-açúcar possui metabolismo fotossintético C₄, assim, uso de forma mais eficiente da luz disponível no ambiente e maior a capacidade da planta para retirar CO₂ atmosférico e transformá-lo em carboidratos quando comparada a plantas C₃ (KOTEYEVA; VOZNESENSKAYA; EDWARDS 2015).

Em campo, as trocas gasosas podem ser estimadas por meio de dispositivos como o IRGA (Analisador de Gas Infravermelho). A taxa de fotossíntese é medida por meio do CO₂ líquido assimilado; a taxa de transpiração pelo fluxo de vapor de água, sendo possível a partir desta, calcular a condutância foliar de vapor de água (LONG; FARAGE; GARCIA, 1996). Sabendo-se dessas variáveis, a taxa líquida de assimilação de CO₂, o nível de CO₂ ambiente, a eficiência da carboxilação (EUC), eficiência instantânea do uso

da água (EUA), eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) podem ser calculados (BEGUM et al., 2012).

O potencial hídrico foliar é de extrema importância para o entendimento das relações hídricas na planta e sua relação com ambiente externo (solo e atmosfera) (CORREIA,2014). Esse potencial fornece um índice relativo ao estresse hídrico que a planta está submetida, identificando diversas alterações fisiológicas, em que o processo mais afetado é o crescimento celular e em seguida a fotossíntese (TAIZ et al.,2017).

Em áreas litorâneas é comum a presença de águas salobras devido a intrusão salina, deposição pela ação das chuvas e dos ventos na forma de aerossóis, que aliado ao excesso de exploração, intensificam os processos de salinização ou sodificação dos solos trazendo prejuízos à atividade agrícola (MUNNS & TESTER, 2008; CUSTÓDIO, 2010; GHODRATI & GHAZARYAN, 2013; COSTA SOBRINHO, 2014; MUNNS, 2016). Nessas condições de cultivo, o metabolismo vegetal como a abertura dos estômatos e a fotossíntese são reduzidas, conseqüentemente o potencial de produção da planta é reduzido (MUNNS & TESTER, 2008). De acordo com Maas (1984), a cultura da cana-de-açúcar apresenta salinidade limiar de 1,7 dS m⁻¹, sendo classificada como moderadamente sensível a salinidade.

Nesse sentido, o conhecimento de indicadores fisiológicos relacionados as trocas gasosas, têm sido apontados como importantes para o conhecimento de genótipos tolerantes às condições menos favoráveis aos cultivos, principalmente condições de estresses abióticos como estresse salino e hídrico (SANTOS JÚNIOR et al., 2006; CERNUSAK et al., 2007; SILVA et al., 2008; SILVA; COSTA; BANDARA 2011; VIEIRA et al., 2014)

Assim, objetivou-se avaliar o efeito da salinidade da água de irrigação e frações de lixiviação no estado hídrico da cana-de-açúcar em Recife, PE.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Estação de Agricultura Irrigada Prof. Ronaldo Freire de Moura, localizada no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, PE, cujas coordenadas geográficas são 8° 01' 06" de latitude Sul e 34° 56' 49" de longitude Oeste, e altitude de 6 m no sistema SAD 69 (South American Datum).

A área total utilizada tem dimensões de 32 m x 75 m (2400 m²), sendo localizada na parte central uma estação lisimétrica (18 m x 25,80 m) composta por 40 lisímetros de

drenagem (1 m³) e uma estação meteorológica automática (18 m x 14,20 m) da Campbell Scientific, modelo CR1000 utilizada para obtenção dos dados climáticos. Os lisímetros foram preenchidos com solo (camada 0 - 0,40 m) proveniente do Município de Goiana, PE classificado como Espodossolo segundo a classificação do Sistema Brasileiro de classificação de solos (SANTOS et al., 2013).

As propriedades físico-químicas do solo são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1. Características físico-químicas do solo dos lisímetros de drenagem, Espodossolo (0-40 cm), Município de Goiana, PE

Química											
pH	P	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺²	K ⁺	Al ⁺³	H	SB	CTC	V	m
H ₂ O	mg dm ⁻³	cmolc dm ⁻³								%	
6,5	49	1,6	0,65	0,06	0,08	0,0	3,05	2,4	5,4	44	0
Física											
M.O	Areia	Silte	Argila	Ds	Dp		θ _{CC} : 0,33 atm		θ _{PMP} : 15 atm		
g kg ⁻¹			g cm ⁻³					(%)			
20,4	890	30	80	1,80	2,63				3,02		1,34

*SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: Saturação por bases; m: saturação por Al⁺³; M.O: matéria orgânica; Ds: densidade do solo; Dp: densidade da partícula; θ: umidade volumétrica.

Os lisímetros são conectados a uma casa de coleta do material drenado dos lisímetros por meio de um sistema de drenagem subterrânea.

De acordo com a Recomendação de Adubação para o Estado de Pernambuco (CAVALCANTE et al., 2008) foi realizada adubação mineral com N, P e K, sendo aplicado na adubação de fundação 20 kg ha⁻¹ de N, 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 35 kg ha⁻¹ de K₂O aos 45 dias após o plantio (DAP). A adubação de cobertura foi feita aos 150 DAP, aplicando-se 20 kg ha⁻¹ de N e 35 kg ha⁻¹ de K₂O. Além disso, foi realizada aplicação dos micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn) via adubação foliar, utilizando 50g do adubo foliar para 20 litros de água, foi realizado três aplicações.

Foi utilizada a variedade de cana-de-açúcar RB92579, semeada na forma de rebolos em sulcos com cerca de 15 cm de profundidade e espaçamento de 1,2 m. O material vegetal utilizado foi proveniente da Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC-UFRPE). Foram colocados seis rebolos por metro linear com duas gemas cada, realizando-se um desbaste após a emergência para permanência de 8 plantas m⁻¹.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 5 x 2, com quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais. Os tratamentos foram constituídos por cinco níveis de salinidade da água de irrigação (CE: 0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dS m⁻¹) e com e sem fração de lixiviação: 100 (0) e 120% (0,17)

da evapotranspiração da cultura, ETc. A aplicação dos tratamentos foi iniciada aos 60 dias após a semeadura (DAS), visto que na fase inicial a cultura apresenta grande sensibilidade à presença de sais.

Os níveis de salinidade da água foram obtidos por meio de adição de NaCl e CaCl₂.H₂O na proporção de 1:1 molar Ca/Na na água de abastecimento local (condutividade elétrica da água, CEa ~ 0,5 dS m⁻¹) da UFRPE, em quantidades necessárias para obtenção das condutividades elétricas dos respectivos tratamentos citados no capítulo 2, conforme Rhoades et al. (2000).

Foi utilizado o método de irrigação por gotejamento com gotejadores autocompensantes, espaçados a 0,30 m e vazão unitária de 4 L h⁻¹. Cada lisímetro ficou com quatro emissores. Para a aplicação das soluções irrigantes foi utilizado duas eletrobombas (Modelo QB80) com 0,5 CV.

A irrigação foi feita diariamente com base na evapotranspiração da cultura (ETc) para reposição das lâminas de 100% e 120% da ETc:

$$ETc = ETo \times Kc \times KI_{med} \quad (1)$$

em que,

ETc: evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹; ETo: evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹; Kc: coeficiente de cultivo, adimensional; KI_{med}: coeficiente de localização médio, adimensional. O Kc utilizado foi correspondente a cada fase fenológica da planta, de acordo com Doorenbos & Pruitt (1977) e o KI_{med} foi determinado segundo metodologia proposta por Keller & Bliesner (1990).

A ETo foi estimada pelo método de Penman-Monteith parametrizado no Boletim 56 da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FAO (ALLEN et al., 1998) a partir dos dados climáticos coletados na estação meteorológica automática.

Durante o ciclo da cultura, dos 90, 150 e 210 dias após a semeadura (DAS) foram realizadas medidas fisiológicas em cada tratamento com um Analisador de Gás Infravermelho (IRGA LI 6400). As medições foram feitas na terceira folha com bainha visível conhecida como folha TVD (Top Visible Dewlap) ou folha +3 (Kuijper) de acordo com a numeração proposta por Kuijper (DILLEWIJN,1952), considerada a folha fisiologicamente madura e não sombreada. As leituras foram realizadas entre as 11 e 13 horas, horário de brilho do sol intenso.

Também foram realizadas coletas de folhas na antemanhã (antes do nascer do sol) aos 90, 150, 210 e 270 dias em intervalos de 60 dias após a semeadura (DAS) para obtenção do potencial hídrico foliar (ψ_w) por meio de uma câmara de pressão de

Scholander, modelo M1505D da PMS Company. As etapas para essa determinação são ilustradas na Figura 1:

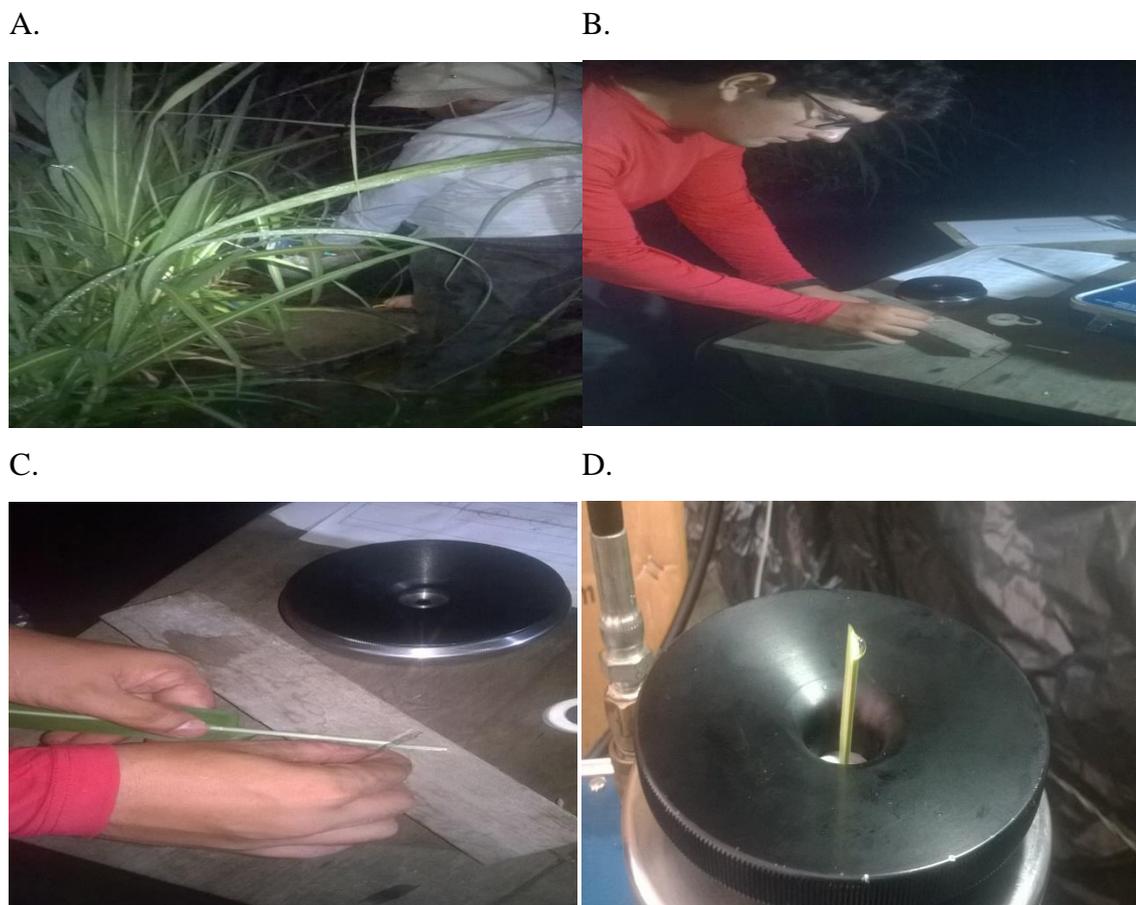


Figura 1. Determinação do potencial hídrico: Coleta de Folhas em campo(A); Corte em bisel (B); Detalhe do corte em bisel (C) e visualização de gotas na superfície do corte(D).

Na Figura 2, está apresentada a evapotranspiração de referência e as duas lâminas de irrigação (100 e 120% da ETc) ao longo do ciclo de cultivo. Durante o desenvolvimento inicial da cultura aplicou-se uma lâmina de 100% da ETc com água de abastecimento da UFRPE ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$) para todos os tratamentos até os 60 DAS, nessa fase a cana-de-açúcar apresenta alta sensibilidade a presença de sais e após esse período deu-se ocorrendo o início da aplicação dos tratamentos aos 60 DAS.

A evapotranspiração de referência acumulada ao longo do ciclo de cultivo foi de 1287,35 mm ($3,52 \text{ mm dia}^{-1}$). As lâminas de irrigação aplicadas com base em 100% e 120% da ETc apresentaram valor acumulado ao longo do ciclo de 522,53 ($3,99 \text{ mm}$) e 609,01 ($4,79 \text{ mm}$).

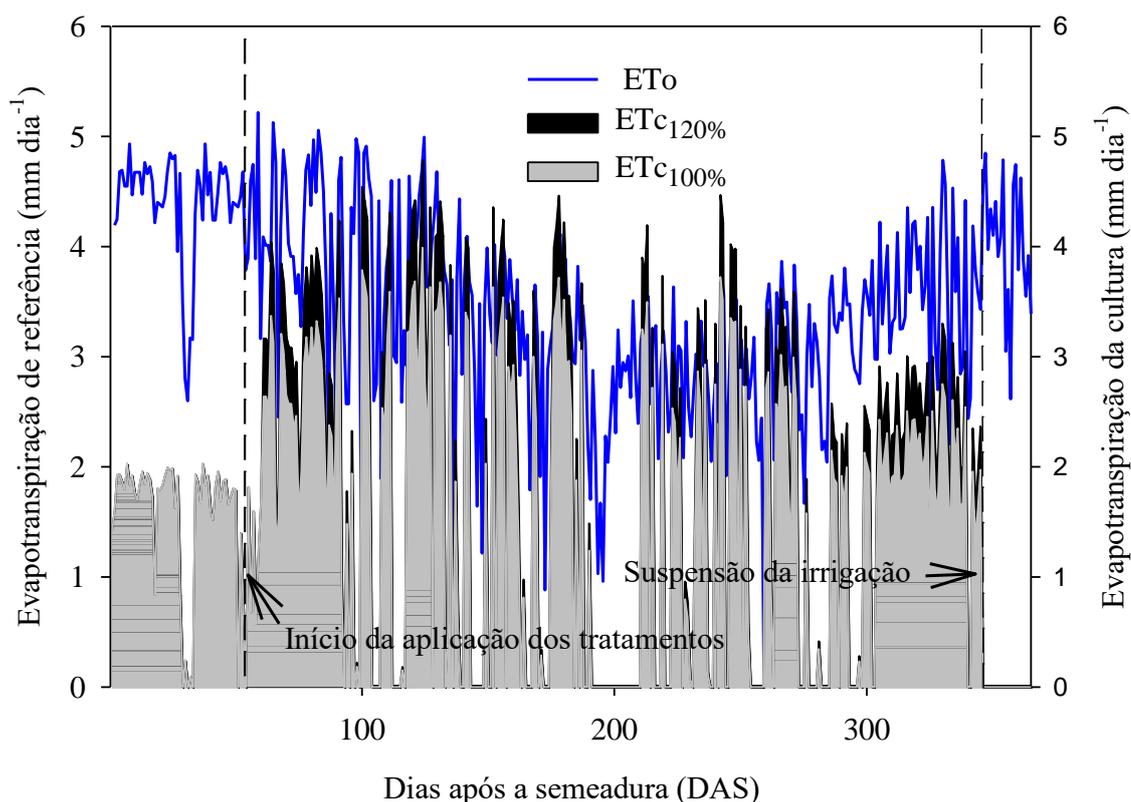


Figura 2. Evapotranspiração de referência e lâminas de irrigação (100 e 120%) ao longo do ciclo de cultivo.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade, homocedasticidade, análise de variância (ANAVA) pelo teste F ($p < 0,05$). Em seguida, os efeitos significativos foram comparados mediante análise de regressão visando ajustar modelos de comportamento. Os modelos de regressão selecionados tiveram como base em sua significância ao teste F ($p < 0,05$) e valor do coeficiente de determinação (R^2). Para todas as análises foi utilizado o software estatístico SISVAR versão 5.2 (FERREIRA, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, pode-se verificar o resumo da análise de variância para as variáveis transpiração (E) eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência intrínseca do uso da água (A/g_{sw}), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) e a relação da concentração intercelular de CO_2 no mesófilo e a concentração de CO_2 externa atual (C_i/C_a). Observou-se que aos 90 DAS houve efeito entre a interação da salinidade e as lâminas de lixiviação para as variáveis transpiração (E) e relação C_i/C_a houve efeito significativo ($p < 0,01$) para os efeitos isolados (salinidade e lâminas de lixiviação). As relações eficiência intrínseca do uso da água (A/E), eficiência instantânea do uso da água (A/g_{sw})

e eficiência de carboxilação (A/C_i) apresentaram efeito significativo ($p < 0,01$) apenas para o fator salinidade.

Tabela 2. Resumo da análise de variância das variáveis Transpiração (E), eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência intrínseca do uso da água (A/g_{sw}), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i), relação da concentração intercelular de CO_2 no mesófilo, concentração de CO_2 externa atual (C_i/C_a) e potencial hídrico foliar (ψ_w) na cana-de-açúcar RB 92579 (Cana planta) irrigada com diferentes níveis de salinidade e lâminas de lixiviação em Recife, PE

F.V	GL	Quadrado médio				
		A/E	A/g_{sw}	A/C_i	C_i/C_a	ψ_w
90 DAS						
CEa	4	0,105*	1061,0**	0,0042**	0,004*	1605,91**
Reg. Linear	1	0,417**	4199,84**	0,0169**	0,013**	6137,19**
Lâmina (L)	1	0,0133 ^{ns}	35,83 ^{ns}	0,0052 ^{ns}	0,014**	853,31**
CEa x L	4	0,003 ^{ns}	62,61 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	738,731**
Resíduo	30	0,0279	39,77	0,0010	0,0012	6,11
CV (%)	-	16,31	9,20	12,29	10,61	3,27
150 DAS						
CEa	4	0,138 ^{ns}	392,9 ^{ns}	0,00002 ^{ns}	0,005 ^{ns}	352,48**
Reg. Linear	1	1,459*	2308**	0,00008 ^{ns}	0,014 ^{ns}	2470,33**
Lâmina (L)	1	1,45*	12356,3**	0,0003 ^{ns}	0,000 ^{ns}	1300,17**
CEa x L	4	0,061 ^{ns}	656,9 ^{ns}	0,00004 ^{ns}	0,0035 ^{ns}	450,93**
Resíduo	30	0,268	271,9	0,00009	0,0063	1,84
CV (%)	-	19,39	19,98	12,30	13,65	2,43
210 DAS						
CEa	4	0,443*	32,66 ^{ns}	0,00014 ^{ns}	8,10**	1251,42**
Reg. Linear	1	1,659**	111,16**	0,000088 ^{ns}	30,24**	4833,32**
Lâmina (L)	1	0,470 ^{ns}	14,94 ^{ns}	0,000003 ^{ns}	62,27**	381,49**
CEa x L	4	0,094 ^{ns}	16,45 ^{ns}	0,00048 ^{ns}	3,55**	232,82**
Resíduo	30	0,148	13,02	0,00018	0,695	2,14
CV (%)	-	11,80	4,20	20,48	2,44	2,32
CEa	-	-	-	-	-	1579,73**
Reg. Linear	-	-	-	-	-	3756,30**
Lâmina (L)	-	-	-	-	-	544,49**
CEa x L	-	-	-	-	-	27,21**
Resíduo	-	-	-	-	-	3,51
CV (%)	-	-	-	-	-	2,85

Aos 150 DAS, verifica-se que houve efeito significativo ($p < 0,01$) da interação salinidade x lâminas de lixiviação apenas para concentração interna de CO_2 intracelular (C_i). Aos 150 DAS, houve efeito isolado da salinidade e das lâminas de lixiviação ($p < 0,01$) para transpiração (E). As relações eficiência instantânea do uso da água (A/E) ($p <$

0,05) e eficiência intrínseca do uso da água (A/g_{s_w}) ($p < 0,01$) apresentaram efeito significativo apenas para as lâminas de lixiviação.

Aos 210 DAS, observou-se houve efeito significativo ($p < 0,01$) para a interação salinidade x lâmina de lixiviação para relação C_i/C_a , já a eficiência instantânea do uso da água (A/E) apresentou efeito significativo ($p < 0,05$) apenas para a salinidade.

Para o potencial hídrico foliar (ψ_w) houve efeito de interação entre os níveis salinos e as lâminas de lixiviação ($p < 0,01$), nas quatro coletas analisadas. Os valores do coeficiente de variação durante estas quatro coletas variaram de 2,32 a 3,27%, segundo Gomes (2009) valores inferiores a 10% indicando que o delineamento estatístico utilizado exerceu bom controle sobre as variações do meio.

3.1 Eficiência instantânea do uso da água (A/E)

Na Figura 3 A, observa-se o efeito isolado da condutividade elétrica da água de irrigação sobre a eficiência instantânea do uso da água (aos 90 DAS). Houve aumento da eficiência à medida que se incrementou a quantidade de sais no solo, com efeito linear ($p < 0,01$). Os valores médios observados foram 0,88 e 1,18 mol CO_2 mol H_2O^{-1} para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m^{-1} , respectivamente. Para esta data, houve uma redução da transpiração em resposta ao incremento de salinidade, possibilitando a menor perda de água, conseqüentemente uma maior eficiência, porém este efeito causa uma menor absorção de CO_2 já que a transpiração é uma via de mão dupla onde a planta libera vapor de água e absorve o CO_2 , esta redução pode promover danos no aparato fotossintético.

Aos 210 DAS (Figura 3 B), apresentou comportamento linear decrescente, onde o incremento nos níveis de salinidade promoveu uma redução da eficiência instantânea do uso da água, podendo estar relacionado ao estágio fenológico da cultura a qual encontrava-se na maturação. Os valores médios de 3,57 e 2,95 mol CO_2 mol H_2O^{-1} (-17,7%) para 0,5 e 8,0 dS m^{-1} , respectivamente. Condições de alta salinidade afetam fortemente a fotossíntese líquida, a condutância estomática, transpiração e eficiência do uso da água (NAIDOO et al., 2011). Gonçalves et al. (2010) relatam reduções de até 36,4% para a variedade RB 92579 sob condições de estresse hídrico severo (capacidade de água disponível no solo: 0 a 20%).

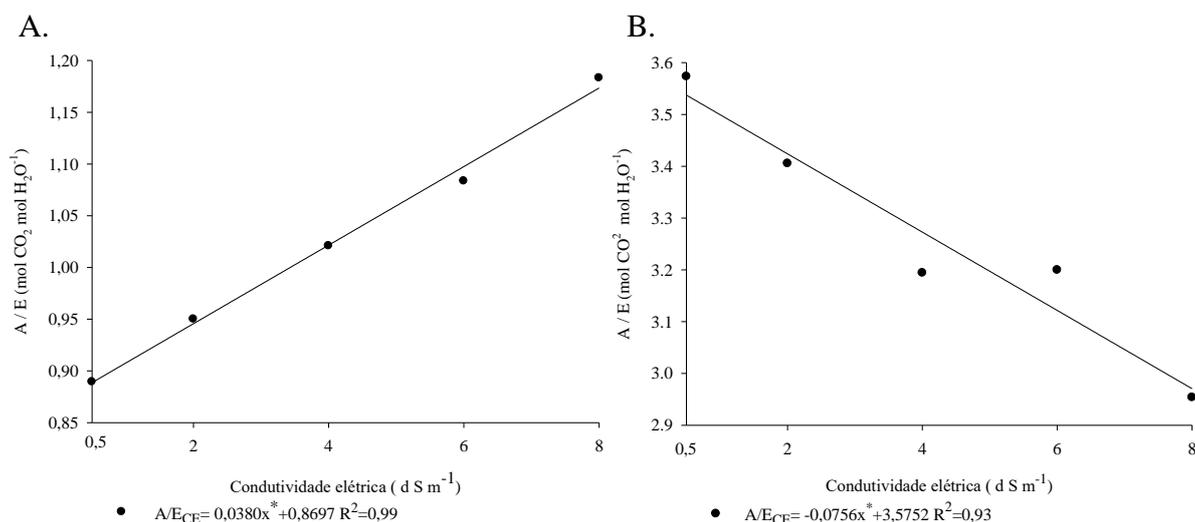


Figura 3. Eficiência instantânea do uso da água (A/E) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A) e 210 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.

Aos 150 DAS (Figura 4), observa-se valores de A/E de 2,86 e 2,48 correspondendo as lâminas de 100% e 120% ET_c , respectivamente. De acordo com Larcher (2004) a melhor relação entre absorção de CO_2 e consumo de H_2O ocorre quando os estômatos estão parcialmente fechados, nesse momento os dois processos de difusão são prontamente reduzidos, fazendo com que a EUA alcance valores mais altos.

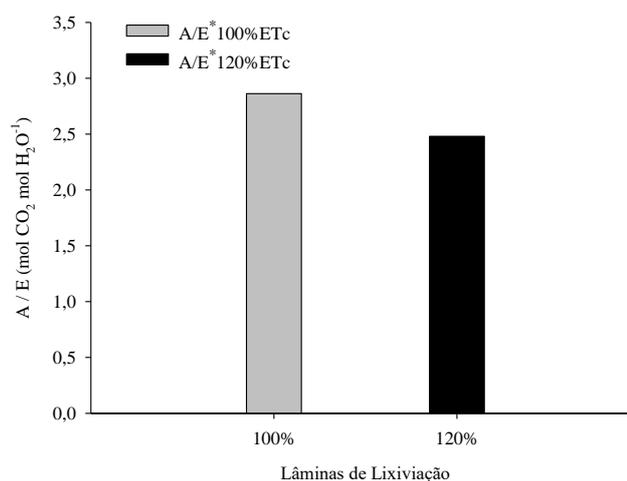


Figura 4. Eficiência instantânea do uso da água (A/E) na cana-de-açúcar (RB 92579) submetida a lâminas de irrigação (Com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

3.3 Eficiência intrínseca do uso da água (A/g_{sw})

Para eficiência intrínseca do uso da água houve aumento à medida que se incrementou a quantidade de sais no solo, com efeito linear ($p < 0,01$) para a interação aos 90 DAS (Figura 5 A).

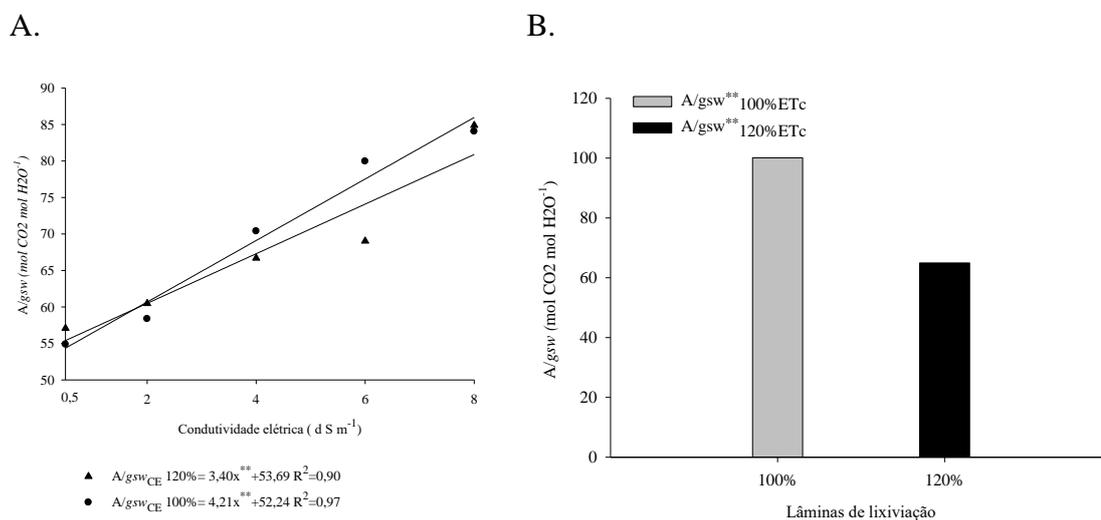


Figura 5. Eficiência intrínseca do uso da água (A/g_{sw}) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação (A) e a lâminas de irrigação (com e sem fração de lixiviação) (B) aos 90 DAS em Recife, PE. *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Os valores médios observados são de 57,07 e 84,89 mol CO₂ mol H₂O⁻¹ para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, para lâmina de 120% da ETc, ou seja, um incremento percentual de 32,77%. A lâmina de 100% da ETc os valores médios foram de 54,86 e 84,05 para os respectivos níveis de salinidade apresentados anteriormente, aumento percentual de 34,72%.

A maior eficiência intrínseca do uso da água para a lâmina de 100% da ETc pode estar relacionada aos menores valores da condutância estomática (Figura 5A) apresentados anteriormente. Aos 150 DAS Figura 5 B, observa-se o efeito isolado das lâminas de irrigação (com e sem fração de lixiviação) para a eficiência intrínseca do uso da água, onde apresentou os seguintes valores 100,09 e 64,94 mol CO₂ mol H₂O⁻¹ para as lâminas de 100 e 120% ETc, proporcionando uma diferença de 35,15 entre as lâminas demonstrando uma maior eficiência da lâmina de 100% ETc, ocorrendo efeito similar com o que foi descrito aos 90 DAS.

3.4 Eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i)

Houve uma tendência de decréscimo da eficiência à medida que se incrementou a quantidade de sais no solo, com efeito linear decrescente ($p < 0,01$). Para o menor valor de salinidade ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$) é observado o maior valor da eficiência, sendo de $0,28$ e $0,23 \text{ CO}_2 \text{ mol CO}_2 \text{ ar}^{-1}$ para as salinidades de $0,5$ e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente, decréscimo percentual de $17,85\%$. Este efeito está relacionado à redução mais acentuada promovida pelo maior incremento de salinidade 8 dS m^{-1} para a fotossíntese e concentração interna de CO_2 (Figura 6).

Para essa relação, Endres et al. (2010) observaram valores médios de $0,1$ e $0,41 \text{ CO}_2 \text{ mol CO}_2 \text{ ar}^{-1}$, em condições de seca moderada e severa, respectivamente, para a variedade RB 92579.

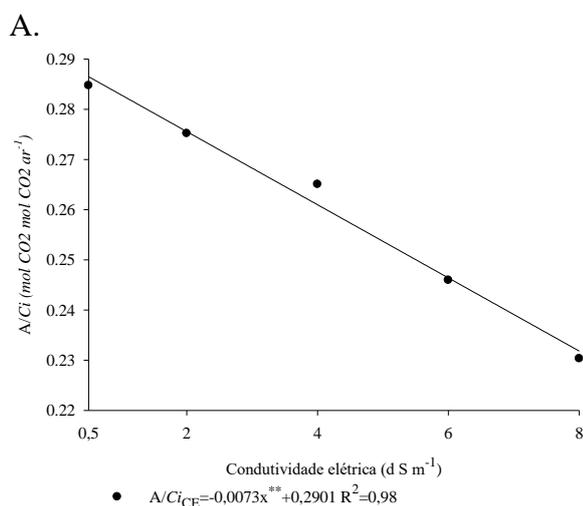


Figura 6. Eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS. *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.

3.5 Relação C_i/C_a

Houve uma tendência de decréscimo da eficiência à medida que se incrementou a quantidade de sais no solo, com efeito linear ($p < 0,01$). Para o menor valor de salinidade ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$) é observado o maior valor da eficiência, sendo de $0,3570$ e $0,3037$ para as salinidades de $0,5$ e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente, ou seja, redução percentual de $14,92\%$ (Figura 7 A). Este efeito está relacionado à redução acentuada promovida pelo incremento

de salinidade para a concentração interna de CO₂ e a redução da transpiração, visto que se a planta transpira menos por consequência absorve menos CO₂.

Aos 210 DAS (Figura 7 B), a relação *Ci/Ca* apresenta comportamento inverso ao observado aos 90 DAS. Houve efeito linear crescente ($p < 0,01$) à medida que se incrementou a quantidade de sais no solo. Observou-se valores médios de 32,63 e 35,19, $\mu\text{mol CO}_2(\text{int}) \mu\text{mol CO}_2(\text{ar})^{-1}$ para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m^{-1} , respectivamente, um incremento percentual de 7,27%. Nesta data, a cana-de-açúcar encontra-se no início de maturação, desse modo há uma maior demanda por CO₂ para ser acumulado e, posteriormente transformado em sacarose.

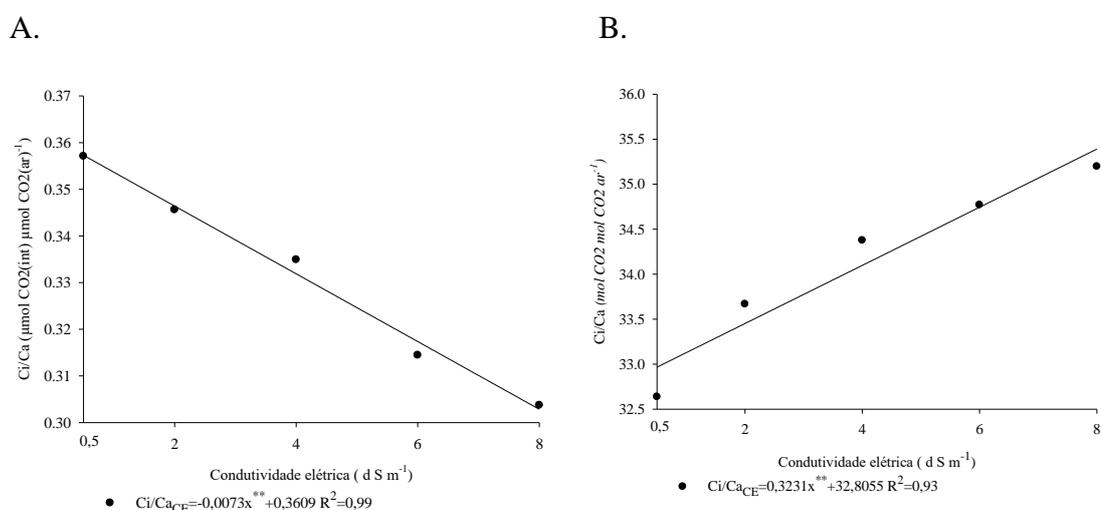


Figura 7. Relação *Ci/Ca* da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A) e 210 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pela análise de regressão.

Na Figura 8 A, observa-se o efeito isolado das lâminas de lixiviação para a relação *Ci/Ca* aos 90 DAS apresentando os valores médios de 0,31 e 0,35 $\mu\text{mol CO}_2(\text{int}) \mu\text{mol CO}_2(\text{ar})^{-1}$ correspondendo as lâminas de 100% e 120% ETC, respectivamente. A lâmina de 120% ETC apresentou uma maior relação *Ci/Ca*, demonstrando que a capacidade de lixiviação foi eficiente em melhorar absorção de CO₂. Aos 210 DAS (Figura 8 B.) observa-se os valores de 32,88 e 35,77 $\mu\text{mol CO}_2(\text{int}) \mu\text{mol CO}_2(\text{ar})^{-1}$ correspondendo as lâminas de 100% e 120% ETC, respectivamente. Quando comparado com a coleta anterior se observa que os valores são superiores, isto pode ter ocorrido devido ao estado fenológico da cultura (maturação), onde ocorre uma maior demanda de CO₂ pela a cultura.

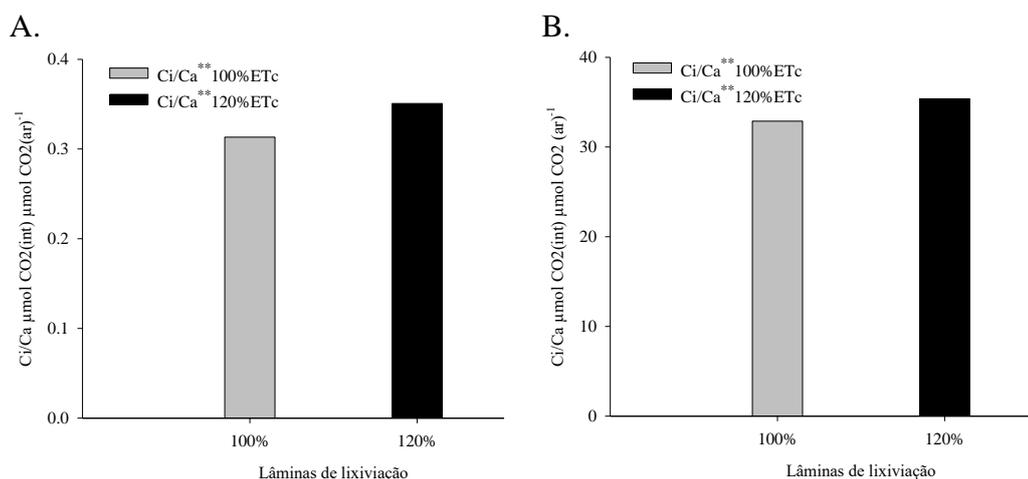


Figura 8. Relação C_i/C_a na cana-de-açúcar (RB92579), submetida a lâminas de irrigação (Com e sem fração de lixiviação) ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 90 DAS (A) e 210 DAS (B). *, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Avaliando a mesma variedade do presente estudo sob diferentes condições de disponibilidade hídrica em Coruripe - AL, Endres et al. (2010) observaram valores da relação C_i/C_a na ordem de 0,23 e 0,39 $\mu\text{mol CO}_2(\text{int}) \mu\text{mol CO}_2(\text{ar})^{-1}$ para as condições de seca moderada e severa, respectivamente. De acordo com Murad et al. (2014), valores baixos dessa relação indicam danos diretos no aparelho fotossintético restringindo a assimilação de CO₂.

3.6 Potencial hídrico foliar (ψ_w)

Na Figura 9 A, observa-se a relação entre a condutividade elétrica da água de irrigação (aos 90 DAS) e o potencial hídrico foliar. Houve um decréscimo linear ($p < 0,01$) do potencial foliar em função do aumento incremento dos níveis de salinidade da água de irrigação, e, conseqüentemente da solução do solo, para 100% da ETc. Os valores médios observados para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m^{-1} foram -0,5044 e -1.1089 MPa, respectivamente, ou seja, redução percentual de 54,51%. O menor valor de potencial hídrico no maior nível de salinidade (8,0 dS m^{-1}) evidencia que a cultura sofreu maior estresse salino neste tratamento.

O potencial de água da folha indica o seu estado hídrico/energético, cujos gradientes explicam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera (TAIZ & ZEIGER, 2013). De acordo com Koonjah et al. (2006) existe alta correlação entre o potencial hídrico foliar e a fotossíntese, de modo que, se a planta perde água a uma taxa

superior à sua capacidade de absorção e transporte, o potencial hídrico da folha diminui, levando ao fechamento dos estômatos e redução da fotossíntese, consequentemente redução na produtividade.

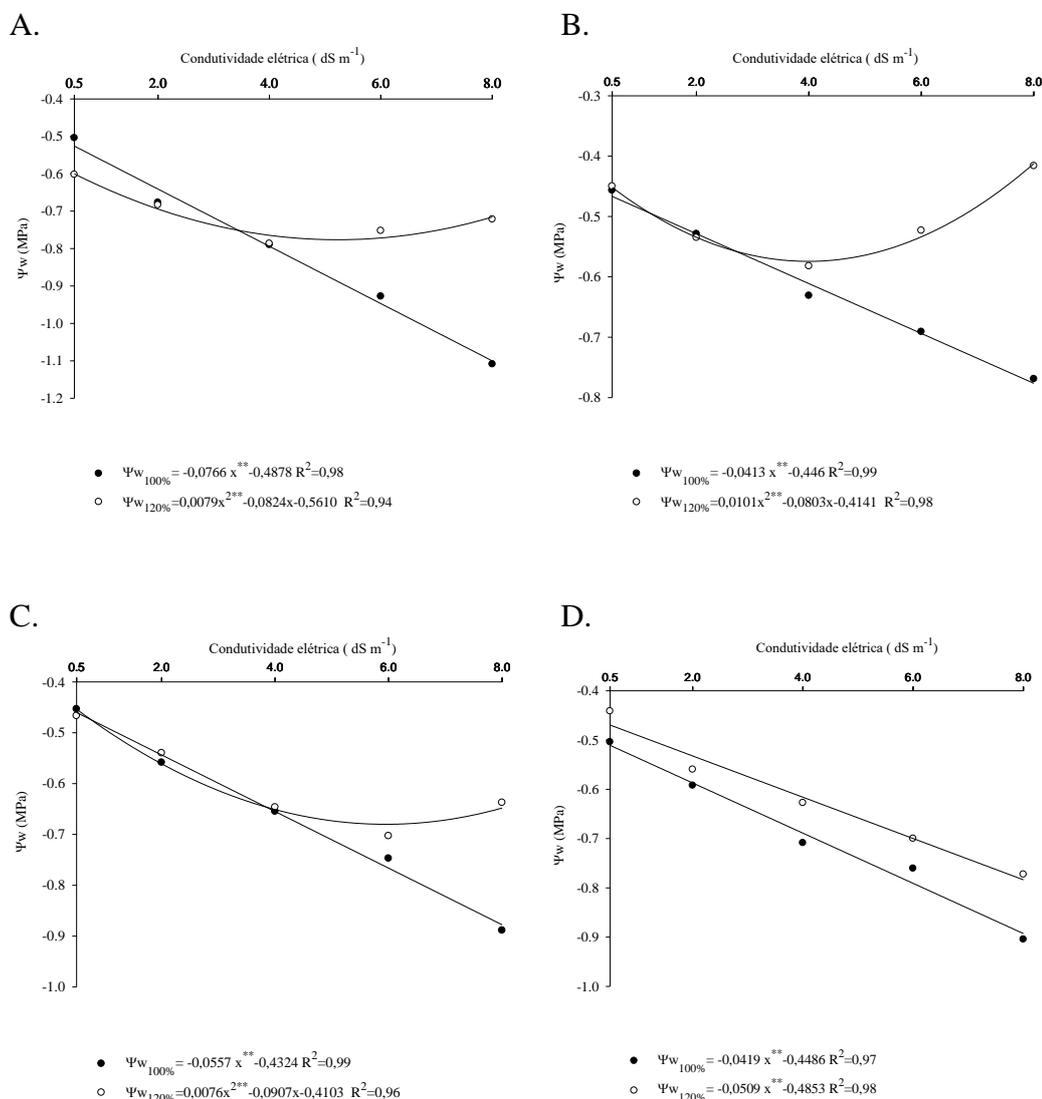


Figura 9. Potencial hídrico foliar da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE.

Para a lâmina de 120% ET_c houve efeito quadrático ($p < 0,01$) apresentando os valores médios de -0,6022 a -0,7216 MPa no intervalo de condutividade elétrica de 0,5 a 5,19 dS m⁻¹, respectivamente, redução de 16,54%. No entanto, a partir da salinidade da água de irrigação de 7,85 dS m⁻¹, ocorre um aumento do potencial hídrico foliar, evidenciando que mecanismos de proteção foram ativados para manter as atividades metabólicas em condições normais.

Além disso, observa-se que a lâmina de lixiviação promoveu um aumento percentual do potencial hídrico foliar de 29,74% (5,19 dS m⁻¹) em relação ao valor mais

baixo obtido na lâmina de 100% da ETc no nível de salinidade de 8,0 dS m⁻¹, demonstrando a eficiência da fração de lixiviação (0,17) em auxiliar na manutenção da pressão de turgescência foliar e reduzindo o efeito do estresse salino.

Aos 150 DAS (Figura 9 B), observa-se resposta similar aos 90 DAS, porém os valores médios do potencial hídrico foliar se apresentam em menor escala devido ocorrência de chuvas no período que lixiviou grande parte dos sais da zona radicular. Os valores médios observados nos níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹ foram -0,4566 e -0,7691 MPa para as salinidades de, respectivamente, ou seja, uma redução de 40,63%.

A lâmina de 120% ETc apresentou efeito quadrático ($p < 0,01$) com valores médios de -0,4499 e -0,5753 MPa para o intervalo de 0,5 a 3,95 d S m⁻¹, redução de 21,95%. A partir da salinidade da água de irrigação de 3,95 dS m⁻¹, onde o estresse salino atinge se nível máximo ocorre um aumento do potencial hídrico foliar até o maior nível de salinidade (8 dS m⁻¹).

Aos 210 DAS (Figura 9 C), houve comportamento similar ao observado aso 150 DAS, diferindo apenas a escala de valores, que devido ao maior acúmulo de sais no solo há maior intensidade do estresse salino. Os valores médios observados para a lâmina de 100% ETc, nos níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹ foram -0,4534 e -0,8887 MPa para as salinidades de, respectivamente, ou seja, uma redução de 48,98%.

A lâmina de 120% ETc apresentou efeito quadrático ($p < 0,01$) com valores médios de -0,4668 e -0,6375 MPa para o intervalo de 0,5 a 5,95 dS m⁻¹, redução de 26,77%. A partir da salinidade da água de irrigação de 5,95 dS m⁻¹, onde o estresse salino atinge se nível máximo ocorre um aumento do potencial hídrico foliar até o maior nível de salinidade (8 dS m⁻¹).

Aos 270 DAS (Figura 9 D), houve interação entre os níveis de condutividade elétrica e as lâminas de irrigação, com efeito linear decrescente ($p < 0,01$) para ambas as lâminas de irrigação (100 e 120% da ETc). Na lâmina de 100% da ETc, observou-se os seguintes valores médios -0,5040 e -0,9045 MPa para as condutividades de 0,5 e 8,0 d S m⁻¹, redução percentual de 44,27%. Nesta leitura, diferentemente da anterior a lâmina de 120% ETc também apresentou um decréscimo do potencial hídrico foliar à medida que se incrementou os níveis da condutividade elétrica com os valores médios de -0,4414 e -0,7725 MPa (-42,86%), para as condutividades de 0,5 e 8,0 d S m⁻¹, respectivamente. Silva et al. (2010) observaram reduções de até 42% no potencial hídrico foliar de genótipos de cana de açúcar submetidos a estresse hídrico.

Endres et al. (2010) avaliando a variedade RB 92579 em condições de deficiência hídrica, em Coruripe - AL, observaram valores de potencial hídrico foliar de -0,9 Mpa

em condições de seca moderada e de até -1,5 MPa sob deficiência hídrica severa. Os autores ressaltam que o potencial hídrico da folha pode ser considerado um bom indicador do estado hídrico da planta.

4. CONCLUSÕES

De modo geral, foi possível notar o aumento das eficiências do uso da água nas plantas mais estressadas demonstrando a habilidade da espécie em se adaptar as condições adversas.

O potencial hídrico foliar foi influenciado de forma negativa pelos níveis salinos promovendo uma diminuição dos valores, devido ao acúmulo de sais no solo, a fração de lixiviação apresentou maior eficiência em aumentar o potencial pelo aumento do potencial osmótico do solo devido a lixiviação dos sais. A redução mais acentuada do potencial hídrico na lâmina de 120% ETc foi observada na salinidade de 5,95 dS m⁻¹.

A fração de lixiviação de 0,17 apresentou a capacidade de reduzir os efeitos deletérios dos sais sobre as plantas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, P. S.; RAES, R.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Dranaige Paper, 56).

BEGUM, M. K. et al. Effect of water stress on physiological characters and juice quality of sugarcane. **Sugar Tech**, v.14, n.2, p.161-167, 2012.

CAVALCANTE F. J. A. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2.ed. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco, 2008. 198p.

CERNUSAK, L. A. et al. Large variation in wholeplant water-use efficiency among tropical tree species. **New Phytologist**, v.173, n.2, p.294-305, 2007.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v.5 - Safra 2018/2019, n.1 - Primeiro Levantamento**. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 08/07/2018.

CORREIA, S. Potencial hídrico. **Revista Ciência Elementar**, v.2, p1-2, 2014.

COSTA SOBRINHO, A.F. **Análise de cenários da salinização dos aquíferos costeiros da planície do Recife levando em conta os efeitos da elevação do nível do mar**. Recife. Universidade Federal de Pernambuco, 2014. 229p. Tese de doutorado.

CUSTÓDIO, E. Coastal aquifers of Europe: an overview. **Hydrogeology Journal**, v.18, p.269-280, 2010.

DALRI, A. B. et al. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, v.13, n.1, p.1-11, 2008.

DILLEWIJN, C. V. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica; New York: Stechert-Hafner, 1952. 371p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. (Irrigation and drainage paper, 24).

ENDRES, L.; SILVA, J. V.; FERREIRA, V. M. et al. Photosynthesis and water relations in Brazilian sugarcane. **The Open Agriculture Journal**, v.4, p.31-37, 2010.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

GHODRATI, M.; GHAZARYAN, S. Agriculture water supply in semi-arid zone by underground dams. **European Journal of Experimental Biology**. v.33, p.706-711, 2013.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15^a ed. Piracicaba: ESALQ, 2009. 451 p.

GONÇALVES, E. R. et al. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.378-386, 2010.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990. 649 p.

KOONJAH, S. S.; WALKER, S.; SINGELS, A.; VAN ANTWERPEN, R.; NAYAMUTH, A. R. A quantitative study of water stress effect on sugarcane photosynthesis. **Proceedings...** South African Sugar Technology Association, Pretoria, v. 80, p. 148-158, 2006.

KOTEYEVA, N. K.; VOZNESENSKAYA, E. V.; EDWARDS, G. E. An assessment of the capacity for phosphoenolpyruvate carboxykinase to contribute to C4 photosynthesis. **Plant Science**, v.235, p.70-80, 2015.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: RiMa, 2004. 531p.

LI-COR, Inc. **Instruction Manual**: IRGA LI-6400/XT - Infrared Gas Analyser. Lincoln, Nebraska USA. 2014. 304 p.

LONG, S. P.; FARAGE, P. K.; GARCIA, R. L. Measurement of leaf and canopy photosynthetic CO₂ exchange in the field. **Journal of Experimental Botany**, v.47, p.1629-1642, 1996.

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

MANHÃES, C. M. C. et al. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, n.1, p.163-181, 2015.

MARIN, F., NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p. 232-239, 2013.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence: a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v.51, p.659-668, 2000.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.651-681, 2008.

MUNNS, R. The impact of salinity stress. **Plantstress**. Virtual article. Disponível em: <http://www.plantstress.com/Articles/salinity_i/salinity_i.htm>. Acesso em: 26/08/2016.

MURAD, A. M.; MOLINARI, H. B. C.; MAGALHÃES, B. S. et al. Physiological and proteomic analyses of *Saccharum* spp. grown under salt stress. **PLoS ONE**, v.9, n.6, 2014.

NAIDOO, G.; HIRALAL, O. Hypersalinity effects on leaf ultrastructure and physiology in the mangrove *Avicennia marina*. **Flora**, v.206, p.814-820, 2011.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, A. C.; SIMÕES NETO, D. E.; ROCHA, A. T.; CARVALHO, L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.6, p.617-625, 2011.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB. Estudos da FAO, Irrigação e Drenagem. 2000, 117p.

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

SANTOS JÚNIOR, U. M.; CARVALHO, J. F. G.; Feldpausch, T. R. Growth, leaf nutrient concentration and photosynthetic nutrient use efficiency in tropical tree species planted in degraded areas in Central Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v.226, n.1-3, p.299-309, 2006.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; HEMMINGSEN, E. A.; BRADSTREET, E. D. Sap pressure in vascular plants. **Science**, v.148, p.339-346, 1965.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L. S. B.; BRANDÃO, E. O. Variação do Balanço de Radiação e de Energia da Cana de açúcar Irrigada no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p.139 -147, 2011.

SILVA, V. S.; GARCIA, C. A.; SILVA, C. M. O destino do bagaço da cana-de-açúcar: Um estudo a partir das agroindústrias sucroalcooleiras do Paraná. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.3, p.59-76, 2010.

SILVA, M. A.; SILVA, J. A. G.; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, JOHN. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agricola**, v, 65, p. 620-627, 2008.

SILVA, A.; COSTA, W.; BANDARA, D. Growth of root system and the patterns of soil moisture utilization in sugarcane under rain-fed and irrigated conditions in Sri Lanka. **Sugar Tech**, v.13, p.198-205, 2011.

SOUTO FILHO, L. T.; LAIME, E. M. O.; FERNANDES, P. D.; SUASSUNA, J.F.; SILVA, R. C. Efeito da salinidade nas trocas gasosas de duas cultivares de cana-de-açúcar **Engenharia Ambiental**, v.11, n.2, p.67-82, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E; MØLLER, I. M; MURPHY A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre; Artmed, 6. ed., 2017.858p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 5. ed., 2013. 954p.

TARGINO, H. C. O.; SILVA, J. A. B.; SILVA, E. P.; AMORIM, M. N.; SEABRA, T. X. Soil salinization and its effects on morpho-physiological characteristics of sugarcane varieties. **Revista Geama**, v.3, n.4, p.184-190, 2017.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; DELAZARIET, F. T. Indicadores morfo-fisiológicos do estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. **Bioscience Journal**, v.30, supplement 1, p.65-75, 2014.

WILKINSON, J. O setor sucroalcooleiro brasileiro na atual conjuntura nacional e internacional. **ActionAid**, (Documentos). 2015. 15p

CAPÍTULO 4

PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E INDICADORES BIOQUÍMICOS COMO DESCRITORES DO ESTRESSE SALINO PARA A CULTURA DA CANA-DE- AÇÚCAR

CAPÍTULO 4 – PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E INDICADORES BIOQUÍMICOS COMO DESCRITORES DO ESTRESSE SALINO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

A salinidade é um estresse abiótico que pode atingir de forma negativa a fotossíntese e intensificar a produção das espécies reativas de oxigênio, prejudicando o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Assim, objetivou-se avaliar a fotossíntese, pigmentos fotossintéticos (Clorofilas *a* e *b*, carotenoides) e atividade enzimática (Catalase e Ascorbato Peroxidase) em cana-de-açúcar irrigada com águas salobras e frações de lixiviação. O experimento foi conduzido no Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, PE. Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5x2, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de cinco níveis de salinidade da água de irrigação (0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dS m⁻¹) e duas frações de lixiviação (0 e 0,17), correspondendo a 100 e 120% da evapotranspiração da cultura. Os níveis de salinidade da água de irrigação foram obtidos por meio da adição de NaCl e CaCl₂ a água de abastecimento, de modo de se obter a proporção molar entre Na:Ca de 1:1. O manejo de irrigação foi realizado diariamente com a utilização de dados uma estação meteorológica. As medidas foram realizadas em uma planta por lisímetro, feita a medição na terceira folha com bainha visível conhecida como folha TVD (Top Visible Dewlap) ou folha +3 (Kuijper). Realizou-se a coleta em uma planta por tratamento, da terceira folha com bainha visível conhecida como folha TVD (Top Visible Dewlap) ou folha +3, em intervalos de 60 dias entre os 60 e 270 dias após o plantio (DAP). Também foram realizadas leituras com o IRGA com intervalos de 60 dias, dos 60 aos 210 DAP. Concluiu-se que a salinidade da água de irrigação influenciou de maneira negativa sobre os pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*, *b* e carotenoides), apresentando um efeito linear decrescente à medida que se incrementou os níveis salinos. A catalase e ascorbato peroxidase apresentaram um efeito quadrático à medida que se incrementou os níveis salinos possuindo efeito crescente até as salinidades de 6,98 dS m⁻¹ e 7,27 dS m⁻¹, respectivamente. A fração de lixiviação de 0,17 apresentou a capacidade de reduzir os efeitos deletérios dos sais sobre as plantas.

Palavras-chave: Fotossíntese, estresse oxidativo, manejo de sais, fração de lixiviação

CHAPTER 4 - PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS AND BIOCHEMICAL INDICATORS AS DESCRIPTORS OF THE SALINE STRESS TO THE CULTURE OF CANA DE AÇÚÇAR

ABSTRACT

Salinity is an abiotic stress that can negatively affect photosynthesis and intensify the production of reactive oxygen species, damaging the development of sugarcane. The objective of this study was to evaluate photosynthesis, photosynthetic pigments (Chlorophyll *a* and *b*, carotenoids) and enzymatic activity (Catalase and Ascorbate Peroxidase) in sugar cane irrigated with brackish water and leaching fractions. The experiment was conducted at the Department of Agricultural Engineering (DEAGRI) of the Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Recife, PE. The experimental design was completely randomized, in a 5x2 factorial scheme, with four replications. The treatments consisted of five levels of irrigation water salinity (0.5, 2.0, 4.0, 6.0 and 8.0 dS m⁻¹) and two leaching fractions (0 and 0.17), corresponding to 100 and 120% of the crop evapotranspiration. The salinity levels of the irrigation water were obtained by addition of NaCl and CaCl₂ to the water supply, in order to obtain the molar ratio between Na: Ca of 1: 1. Irrigation management was performed daily with the use of data from a meteorological station. The measurements were carried out in a plant by lysimeter, measured on the third sheet with visible sheath known as TVD (Top Visible Dewlap) sheet or sheet +3 (Kuijper). The third leaf with a visible sheath known as TVD (Top Visible Dewlap) or leaf +3 was collected in a plant by treatment, at 60 day intervals between 60 and 270 days after planting (DAP). IRGA readings were also performed at 60 day intervals, from 60 to 210 DAP. It was concluded that the salinity of the irrigation water had a negative influence on the photosynthetic pigments (chlorophyll *a*, *b* and carotenoids), presenting a decreasing linear effect as salt levels increased. Catalase and ascorbate peroxidase showed a quadratic effect as salt levels increased, increasing to salivation of 6.98 dS m⁻¹ and 7.27 dS m⁻¹, respectively. The leaching fraction of 0.17 showed the ability to reduce the deleterious effects of the salts on the plants.

Key-words: Photosynthesis, oxidative stress, salt management, leaching fraction

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, assim apresentando grande importância para o agronegócio brasileiro. A conscientização ambiental, principalmente devido a utilização de combustíveis fósseis e seus efeitos indesejáveis no balanço de carbono na atmosfera contribuindo para o aquecimento global tem sido destaque na atualidade. Neste contexto, as usinas sucroalcooleiras tornam-se uma alternativa rentável visto que o etanol é um combustível de fonte renovável e considerado ecológico e ainda produzem açúcar e energia elétrica através da utilização de biomassa. A produção de biomassa dessa cultura estimada para a safra 2018/2019 é de 625,96 milhões de toneladas (CONAB,2018).

As áreas produtoras de cana do estado de Pernambuco estão situadas na Zona da Mata e no Litoral pernambucano, na safra 2017/2018 o Estado produziu 10.909.710,00 de toneladas, sendo o segundo maior produtor da região nordeste ficando atrás do estado de Alagoas que produziu 13.733.873,00 toneladas (SINDAÇÚÇAR, 2018). A região Nordeste com seus nove estados, apresenta em 54% dos canaviais algum tipo de irrigação sendo 492,665 mil hectares de um total de 1,003 milhão de hectares plantados com cana. O Estado de Alagoas é o que apresenta o maior percentual de irrigação e área irrigada (75%), seguida da Paraíba (54%) e Pernambuco com apenas 15%, e com alto potencial de uso dessa prática em novas áreas (AFCP,2018).

Em regiões litorâneas é comum a presença de águas salobras devido a intrusão de água do mar em relação ao continente. A utilização desta água para irrigação sem um manejo correto pode acarretar grandes prejuízos, provocando a salinização ou sodificação dos solos que promovem modificações fisiológicas e bioquímicas nas plantas. A técnica da fração de lixiviação que consiste na aplicação de uma lâmina de água excedente a necessidade da cultura, possibilita a remoção dos sais provenientes da água de irrigação ou presentes no solo se concentrem abaixo da zona radicular (AYERS & WESTCOT, 1999).

Os principais problemas provenientes do acúmulo de sais no solo são a redução do potencial osmótico da solução do solo, provocando a redução da disponibilidade hídrica e acentuando a toxicidade de certos íons as plantas (BERNARDO,1996). Segundo Mittler (2002) todo estresse abiótico pode ocasionar o estresse oxidativo, proveniente do acúmulo de espécies reativas de oxigênio (O_2 , H_2O_2 , OH). É importante ressaltar que a resposta de uma espécie ou cultivar ao estresse salino pode ocorrer de diferentes

mecanismos de resposta, como estratégia de defesa. Uma das estratégias é o acúmulo de açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos e íons específicos.

A capacidade de ativação de mecanismos de defesa antioxidantes pode prevenir o acúmulo de EROS e o estresse oxidativo extremo (BHATTACHARJEE, 2010). Enzimas são proteínas que catalisam reações químicas e mediam uma enorme variedade de reações bioquímicas que estabelecem a vida, portanto são fundamentais para a manutenção de qualquer organismo.

As enzimas antioxidantes encontram-se presentes em diferentes compartimentos celulares e colaboram para o controle das ROS em plantas, o que confere um estágio de homeostase redox no sistema. Dentre as enzimas antioxidantes destacam-se ascorbato peroxidase (APX), catalase (CAT) e superóxido dismutase (SOD) (MITTLER, 2002; KIM & KWAK, 2010; DINAKAR et al., 2012).

Outra estratégia é a redução na biossíntese de clorofilas para economia de energia e reduzir a captação de energia luminosa. Essa redução pode ser atribuída ao aumento da atividade da enzima clorofilase que degrada a clorofila, induzida pela degradação de β -caroteno e a redução na formação de zeaxantina, produzindo diminuição no teor de carotenóides, pigmentos aparentemente envolvidos na proteção contra a fotoinibição (SILVEIRA et al., 2010).

Assim, objetivou-se avaliar a fotossíntese, pigmentos fotossintéticos (Clorofilas *a* e *b*, carotenoides), atividade enzimática (Catalase e Ascorbato Peroxidase) em cana-de-açúcar irrigada com águas salobras e frações de lixiviação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em lisímetros de drenagem no Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), campus Recife (Latitude: 8°01'05" S, Longitude: 34°56'48" O e Altitude: 6,5 m).

De acordo com Alvares et al. (2014), o clima da região é classificado como As, Megatérmico Tropical (tropical úmido) segundo a classificação de Köppen. Apresenta a seguinte média histórica das principais variáveis meteorológicas: precipitação pluvial de 2.263,5 mm ano⁻¹; as temperaturas máxima e mínima do ar de 29,1 e 21,8 °C, respectivamente; a umidade relativa do ar média 79,8%; evapotranspiração média entre 1.000 e 1.600 mm ano⁻¹ (INMET, 2018; BARROS, 2016).

A área total utilizada possui as seguintes dimensões 32 m x 75 m (2400 m²), estando uma área central dividida em duas: estação lisimétrica (18 m x 25,80 m) formada por 40 lisímetros de drenagem conectados a uma casa de coleta do material drenado e uma estação meteorológica (18 m x 14,20 m) automática (Campbell Scientific, modelo CR1000) utilizada para manejo da irrigação.

O solo utilizado nos lisímetros foi um Espodosolo, correspondente a camada de 0-40 cm, com características físico-químicas determinadas conforme metodologia da EMBRAPA (2011): areia = 890 g kg⁻¹, silte = 30 g kg⁻¹, argila = 80 g kg⁻¹, classe textural = arenosa, densidade do solo = 1,80 g cm⁻³, densidade da partícula = 2,63 g cm⁻³, umidade volumétrica (0,33 atm) = 3,02%, umidade volumétrica (15 atm) = 1,34%, matéria orgânica = 20,39 g kg⁻¹, pH(H₂O) = 6,5, P = 49 mg dm⁻³, K⁺ = 0,08 cmolc dm⁻³, Ca²⁺ = 1,6 cmolcdm⁻³, Mg²⁺ = 0,65 cmolc dm⁻³, Na⁺ = 0,06 cmolc dm⁻³, Al³⁺ = 0,0 cmolcdm⁻³, capacidade de troca de cátions = 5,4 cmolcdm⁻³, saturação por bases = 44%, saturação por alumínio = 0%.

De acordo com a Recomendação de adubação para o Estado de Pernambuco (CAVALCANTE et al., 2008) a adubação mineral de fundação foi feita com N, P e K aplicando-se 20 kg ha⁻¹ de N, 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 35 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente, aos 45. Aos 150 dias após o plantio (DAP), foi realizada a adubação de cobertura aplicando-se 20 kg ha⁻¹ de N e 35 kg ha⁻¹ de K₂O. A aplicação dos micronutrientes (B, Cu, Zn, Fe e Mg) foi realizado via adubação foliar.

A cultivar de cana-de-açúcar foi a RB 92579, utilizando-se seis rebolos com duas gemas cada por metro linear, em sulcos 15 cm de profundidade, sendo realizado um desbaste após a emergência para permanência de oito plantas m⁻¹. O material vegetal utilizado foi proveniente da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC-UFRPE). O espaçamento entre linhas foi de 1,20 m entre fileiras.

Para a determinação da atividade da Catalase (CAT) e da Ascorbato peroxidase (APX), foi coletada a folha +3 por tratamento, que é a terceira folha da haste ou barbela da bainha visível conhecida como folha TVD (Top Visible Dewlap) (Kuijper) (MALAVOLTA et al., 1997), aos 90,150,210, 270 DAS. Para determinação da Catalase foram utilizadas as metodologias propostas por Berris & Sizer (1952) e Fatibello-Filho & Vieira (2002) e, para a Ascorbato Peroxidase as de Kar & Mishra (1976) e Nakano & Asada (1981).

A.



B.



C.



D.



Figura 1. Coleta de folhas em campo: corte da folha (A), identificação do papel alumínio (B), imersão em nitrogênio líquido (C) e armazenamento em isopor (D). **Fonte:** Elaborado pelo autor.

As plantas foram identificadas com uma fita de Nylon. A coleta do material foi realizada com o auxílio de uma tesoura e de uma escada, onde as folhas +3 foram cortadas (Figura 1 A) e colocadas em papel alumínio com duas etiquetas uma de cada lado do papel para a identificação das plantas (Figura 1 B).

Após a coleta as folhas foram submersas em nitrogênio líquido com o auxílio de uma pinça e de uma garrafa, em seguida foram colocadas em um isopor com gelo para manter o congelamento (Figura 1 C e D). Esse processo foi fundamental para que a folha tenha uma paralisação de suas atividades bioquímicas e, assim garantir a não degradação de nenhum componente celular.

O armazenamento foi realizado em ultra freezer em uma temperatura de -80°C , até o momento da leitura em laboratório. O preparo do extrato foi realizado pesando-se 0,1g de matéria fresca, em uma balança de precisão (0,0001 g), macerando em Nitrogênio líquido (N_2), com auxílio de um pistilo e almofariz. Em seguida, acrescentou-se 4 mL do

tampão fosfato de potássio (gelado), pH 7,0 e Polivinilpirrolidona (PVP) para evitar a oxidação das enzimas durante o processo.

Após a maceração o concentrado foi filtrado e colocado em tubos de eppendorf de 2 ml, colocados em centrifuga refrigerada por 10 minutos a 10.000 g a 4°C. Então, foi coletado o sobrenadante com a utilização de um pipetador automático, as amostras foram identificadas e colocadas tubos de eppendorf e, em seguida, congeladas em freezer. Todos os procedimentos para o preparo do extrato foram realizados em recipientes contendo gelo.

Análise de pigmentos fotossintéticos

$$\text{Clorofila } a \text{ (mg g}^{-1}\text{MF)} = 12,21 A_{663} - 2,81 A_{646}$$

$$\text{Clorofila } b \text{ (mg g}^{-1}\text{MF)} = 20,13 A_{646} - 5,03 A_{663}$$

$$\text{Carotenóides (mg g}^{-1}\text{MF)} = \frac{1000 A_{470} - 3,27Cl_a - 104Cl_b}{229}$$

Sendo, A_{663} , A_{646} e A_{470} as absorbâncias de clorofila a , b e carotenóides respectivamente. As equações e a metodologia foram utilizadas segundo Lichtenthaler & Wellburn, 1983.

As análises estatísticas foram realizadas com base no delineamento adotado realizando-se análise dos dados á significância de 5% de probabilidade e os significativos pelo teste F, é submetido a análise de regressão, visando ajustar modelos de comportamento. Os modelos de regressão selecionados tiveram como base em sua significância ao teste F 5% de probabilidade e no maior valor do coeficiente de determinação. Para todas as análises foi utilizado o software estatístico SISVAR versão D5.2 (FERREIRA, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se que aos 90 DAS, os pigmentos fotossintéticos (clorofila a e b e carotenóides), e as enzimas (APX e CAT) não apresentaram efeito significativo, podendo estar relacionado ao pouco tempo que a cultura esteve exposta ao estresse, pois nesta leitura a cana-de-açúcar estava no início do estresse, ou seja, 30 dias após a diferenciação dos tratamentos.

Aos 150 e 210 DAS verifica-se que houve efeito significativo ($p < 0,01$) para a interação salinidade x lâminas de lixiviação para clorofila a , clorofila b e ascorbato

peroxidase ($p < 0,01$). A catalase e os carotenóides apresentaram significância de ($p < 0,01$) para os fatores isolados.

Aos 270 DAS observa-se que houve efeito significativo ($p < 0,01$) para clorofila *a*, clorofila *b*, carotenóides, catalase e ascorbato peroxidase. Ao longo das quatro leituras os coeficientes de variação ficaram na faixa entre 1,71 a 7,24% que segundo Gomes (2009) valores inferiores a 10% são considerados baixos demonstrando uma boa precisão do experimento.

Tabela 1. Resumo da análise de variância dos pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*, clorofila *b*, carotenóides), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), na cana-de-açúcar RB 92579 (Cana planta) irrigada com diferentes níveis de salinidade e lâminas de lixiviação em Recife, PE

Quadrado médio						
90 DAS						
FV	GL	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Carotenóides	CAT	APX
CEa	4	0,001388 ^{ns}	0,003584 ^{ns}	0,000006 ^{ns}	1,4827 ^{ns}	6959,08 ^{ns}
Regressão	1	0,001624 ^{ns}	0,012590 ^{ns}	0,000002 ^{ns}	0,0508 ^{ns}	8598,83 ^{ns}
Lâmina (L)	1	0,001000 ^{ns}	0,008123 ^{ns}	0,000018 ^{ns}	0,0697 ^{ns}	5060,02 ^{ns}
CEa x L	4	0,000875 ^{ns}	0,001529 ^{ns}	0,000055 ^{ns}	2,8005 ^{ns}	3954,22 ^{ns}
Resíduo	30	0,111350	0,017881	0,000498	70,1650	55026,46 ^{ns}
CV(%)	-	1,71	3,46	3,18	3,47	7,24
150 DAS						
CEa	4	5,771506 ^{**}	4,272171 ^{**}	0,204143 ^{**}	60793,9 ^{**}	285968767,68 ^{**}
Regressão	1	22,524120 ^{**}	16,100500 ^{**}	0,802502 ^{**}	40020,1 ^{**}	148436085,83 ^{**}
Lâmina (L)	1	39,342722 ^{**}	29,790760 ^{**}	0,266783 ^{**}	404,018 ^{**}	361975141,74 ^{**}
CEa x L	4	0,508154 ^{**}	1,247166 ^{**}	0,000679 ^{ns}	0,532 ^{ns}	13907031,47 ^{**}
Resíduo	30	0,018379	0,009948	0,000339	546,753	1331105,15
CV(%)	-	3,16	3,44	2,50	4,44	4,66
210 DAS						
CEa	4	3,425484 ^{**}	7,524521 ^{**}	0,237452 ^{**}	96507,4 ^{**}	330501947,86 ^{**}
Regressão	1	13,659899 ^{**}	15,216599 ^{**}	0,562401 ^{**}	62700,4 ^{**}	234341196,80 ^{**}
Lâmina (L)	1	29,929000 ^{**}	0,010240 ^{**}	0,562401 ^{**}	153313,92 ^{**}	493723065,30 ^{**}
CEa x L	4	0,120756 ^{**}	0,104621 ^{**}	0,001766 ^{**}	532,74 ^{ns}	13153324,73 ^{**}
Resíduo	30	0,014800	0,012412	0,000494	474,99	1642643,9
CV(%)	-	2,67	5,98	3,16	4,18	4,57
270 DAS						
CEa	4	2,608421 ^{**}	10,635069 ^{**}	0,151054 ^{**}	168342,18 ^{**}	307386521,1 ^{**}
Regressão	1	11,627245 ^{**}	41,489807 ^{**}	0,153450 ^{**}	129568,27 ^{**}	188947507,6 ^{**}
Lâmina (L)	1	18,157562 ^{**}	183,269610 ^{**}	0,153450 ^{**}	156973,33 ^{**}	425298187,7 ^{**}
CEa x L	4	0,865294 ^{**}	1,714866 ^{**}	0,001527 ^{**}	3893,40 ^{**}	12001443,56 ^{**}
Resíduo	30	0,005006	0,060022	0,00162	325,87	593588,48
CV(%)	-	1,81	5,57	1,60	2,88	2,92

*, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo pelo teste F; GL - Grau de liberdade; CV - Coeficiente de variação

3.1 Clorofila *a*

Na Figura 2 A, observa-se a interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação e lâminas de lixiviação para clorofila *a* (aos 150DAS). Houve um decréscimo

da clorofila *a* com efeito linear ($p < 0,01$) em função do incremento da salinidade da água de irrigação para as duas lâminas de irrigação (100% e 120% ETc).

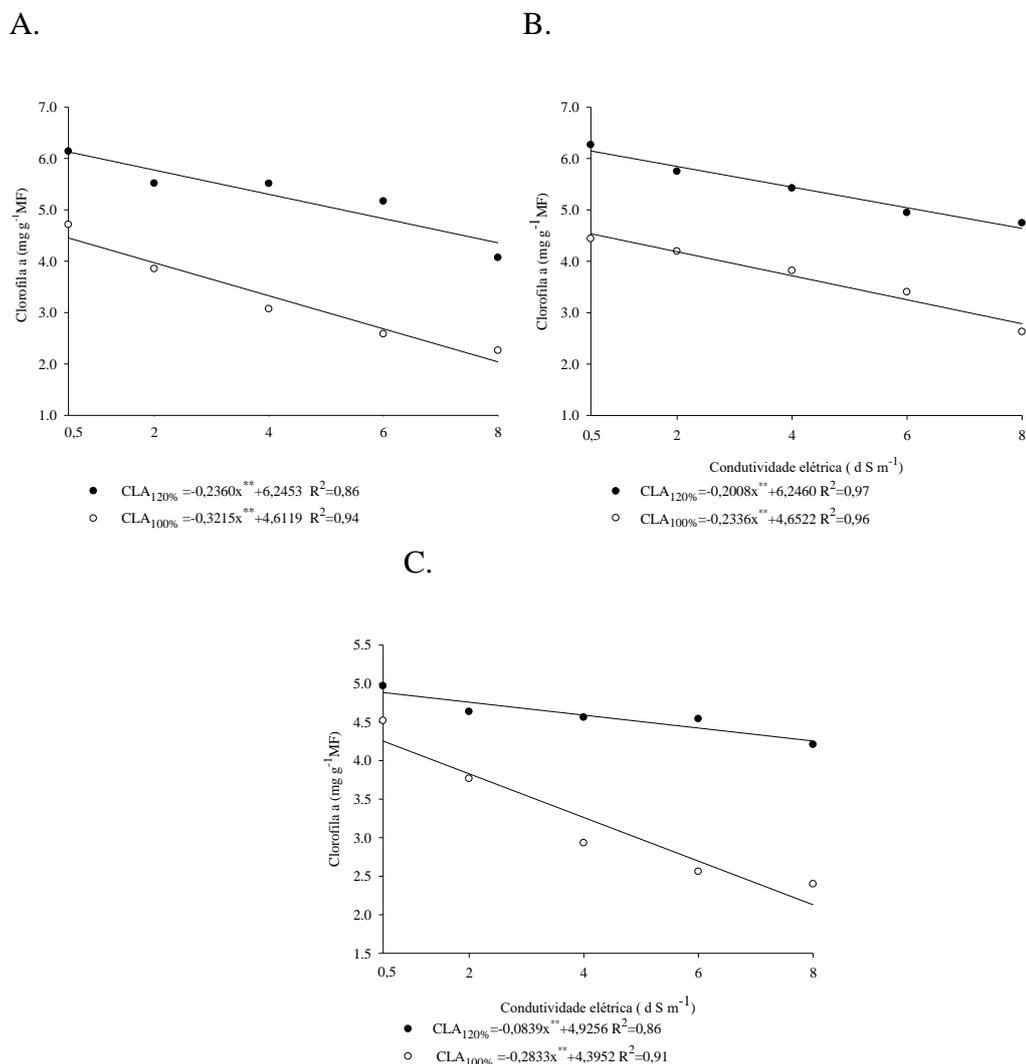


Figura 2. Teor de clorofila *a* da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A), 210 DAS (B) e 270 DAS (C).

Para a lâmina de 100% da ETc os valores médios observados foram 4,451 e 2,039 mg g^{-1} MF para as salinidades de 0,5 e 8,0 d S m^{-1} , respectivamente, uma redução percentual de 54,17%. Na lâmina de 120% da ETc, a redução foi de 28,88%, com valores médios de 6,127 e 4,357 mg g^{-1} MF para os tratamentos com 0,5 e 8,0 d S m^{-1} , respectivamente, demonstrando uma maior eficiência da lâmina de lixiviação (0,17) na redução da intensidade de estresse salino.

Aos 210 DAS (Figura 2 B) também observa-se a efeito linear decrescente ($p < 0,01$), promovendo valores para a lâmina de 100% da ETc na ordem de 4,535 e 2,783 mg

g^{-1} MF (-38,62%) e para a lâmina de 120% ETc valores médios de 6,145 e 4,639 mg g^{-1} MF (-24,50%) correspondendo aos níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m^{-1} , respectivamente. Reduções significativas no conteúdo de clorofila *a*, também foram observados por Targino et al. (2017) avaliando a RB 92579 no crescimento inicial submetida a salinidade de 4,6 dS m^{-1} .

O acúmulo de sais no sistema radicular da planta pode limitar a absorção de outros nutrientes, tais como nitrogênio, magnésio e ferro, que são importantes para síntese de clorofila. Além disso, ocorre a inativação e redução da atividade de algumas enzimas que participam na via de síntese da clorofila (DJANAGUIRAMAN et al., 2006; TARGINO et al., 2017).

Aos 270 DAS (Figura 2 C) ocorreu a interação da condutividade elétrica da água de irrigação e lâminas de lixiviação, apresentando uma redução linear ($p < 0,01$) nos valores da clorofila *a*. Essa redução ocorreu de forma mais acentuada para a lâmina de 100% ETc (-49,95%). A lâmina de 120% ETc a redução foi de 12,88% demonstrando a eficiência da fração 0,17 para a redução da intensidade do estresse salino por promover a lixiviação dos sais da zona radicular, assim reduzindo o efeito tóxico dos íons de sódio e, conseqüentemente diminuindo o estresse oxidativo. Em experimento realizado por Silva et al. (2013) com intuito de avaliar os pigmentos fotossintéticos das variedades de cana-de-açúcar HoCP93-776 (susceptível à seca) e TCP02-4587 (tolerante à seca) sob déficit hídrico (seca), foram observadas reduções do conteúdo de clorofila *a* de 42 e 22,6%, para as variedades estudadas, respectivamente.

Os resultados obtidos no presente trabalho Carvalho et al. (2011) e Silva et al. (2016) ao relatarem que condições ambientais adversas (deficiência hídrica e salinidade) acarretam desequilíbrios entre a produção e a remoção das EROs, gerando um desbalanço capaz de desencadear estresse oxidativo, devido uma série de implicações negativas nos mecanismos metabólicos, associados aos processos fotossintéticos. O excesso de sais, além do limite tolerado por parte das espécies vegetais, estimula a ação da enzima clorofilase, que, diante das condições adversas de salinidade do solo, passa a atuar degradando as moléculas dos pigmentos fotossintetizantes (LIMA, 2014; GERÔNIMO, 2016).

3.2 Clorofila *b*

Aos 150 DAS (Figura 3 A), houve um decréscimo da clorofila *b* em função do incremento da salinidade da água de irrigação, com efeito significativo linear ($p < 0,01$) para as lâminas de lixiviação (100% e 120% ETC).

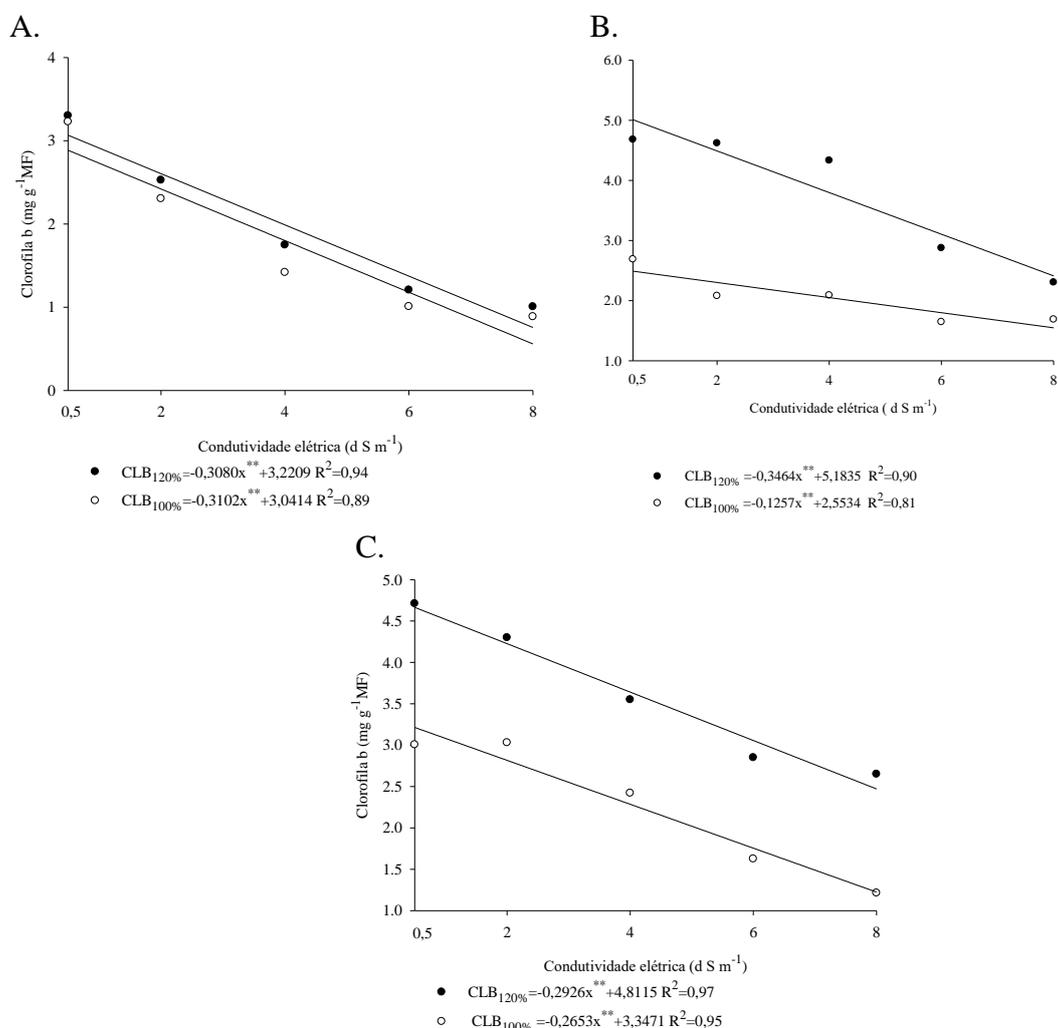


Figura 3. Teor de clorofila *b* da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A), 210 DAS (B) e 270 DAS (C).

Para a lâmina de 100% da ETC os valores médios observados foram 2,886 e 0,559 mg g⁻¹ MF (-80,60%) para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente. Para a lâmina de 120% da ETC, observa-se os seguintes valores: 3,066 e 0,756 mg g⁻¹ MF, para os respectivos níveis de salinidade, sendo uma redução de 75,32%.

Aos 210 DAS (Figura 3 B) a Clorofila *b*, apresentou valores maiores, devido a presença de chuvas no período, reduzindo o acúmulo de sais no solo que promoveram valores para a lâmina de 100 e 120% da ETC na ordem de 2,490 e 1,547 mg g⁻¹ MF (-

37,85%) e de 5,010 e 2,412 mg g⁻¹ MF (-51,85%) correspondendo aos níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente.

Na Figura 3 C (270 DAS) também houve uma redução linear ($p < 0,01$) nos valores da clorofila *b*. Porém, de forma mais acentuada, apresentando os valores de 3,214 e 1,224 mg g⁻¹ MF (100% ETc = -61,90%) e 4,665 e 2,470 (120% ETc = -47,03%) nos níveis de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente. Assim como ocorreu para clorofila *a*, a degradação da clorofila *b* é uma das consequências do estresse salino, que pode levar à fotoinibição e diminuição da eficiência fotossintética como já discutido anteriormente, além disso, de acordo com Silva et al. (2014) essa degradação pode afetar ainda, outros processos celulares como a divisão e expansão celular, refletindo no crescimento e produtividade da cultura.

3.3 Carotenóides

Houve um decréscimo dos carotenóides (Figura 4 A) em função do incremento da salinidade da água de irrigação, com efeito significativo ($p < 0,01$) linear para a condutividade elétrica, observando o fator isolado para a salinidade aos 150 DAS. Os valores médios observados foram 0,9433 e 0,5510 mg g⁻¹ MF, correspondentes aos níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, promovendo uma redução de 41,58%.

O efeito isolado para as lâminas de lixiviação (Figura 4B) aos 150 DAS, apresentou os seguintes valores 0,8166 e 0,6533 para as lamina de 120% e 100%, respectivamente, a lâmina de 120% promoveu um incremento de 19,99%.

Os carotenóides são pigmentos acessórios que absorvem radiação visível (400 - 700 nm), agindo como um filtro à radiação ultravioleta e reduzindo danos celulares decorrentes da incidência de luz em demasia, bem como exercendo função fotoprotetora por meio da rápida extinção dos estados excitados da clorofila, protegendo, assim, as células da foto-oxidação (TAIZ & ZEIGER, 2013).

Como observado no presente estudo à elevação do nível de salinidade do solo apontou que os crescentes níveis de CE proporcionaram reduções no teor de carotenóides. Esse comportamento, segundo Gomes et al. (2011) pode ser atribuído, dentre a outras causas, ao fato do estresse salino desacelerar a produção de pigmentos fotossintéticos, induzindo a degradação de β - caroteno, provocando uma diminuição no teor de carotenóides.

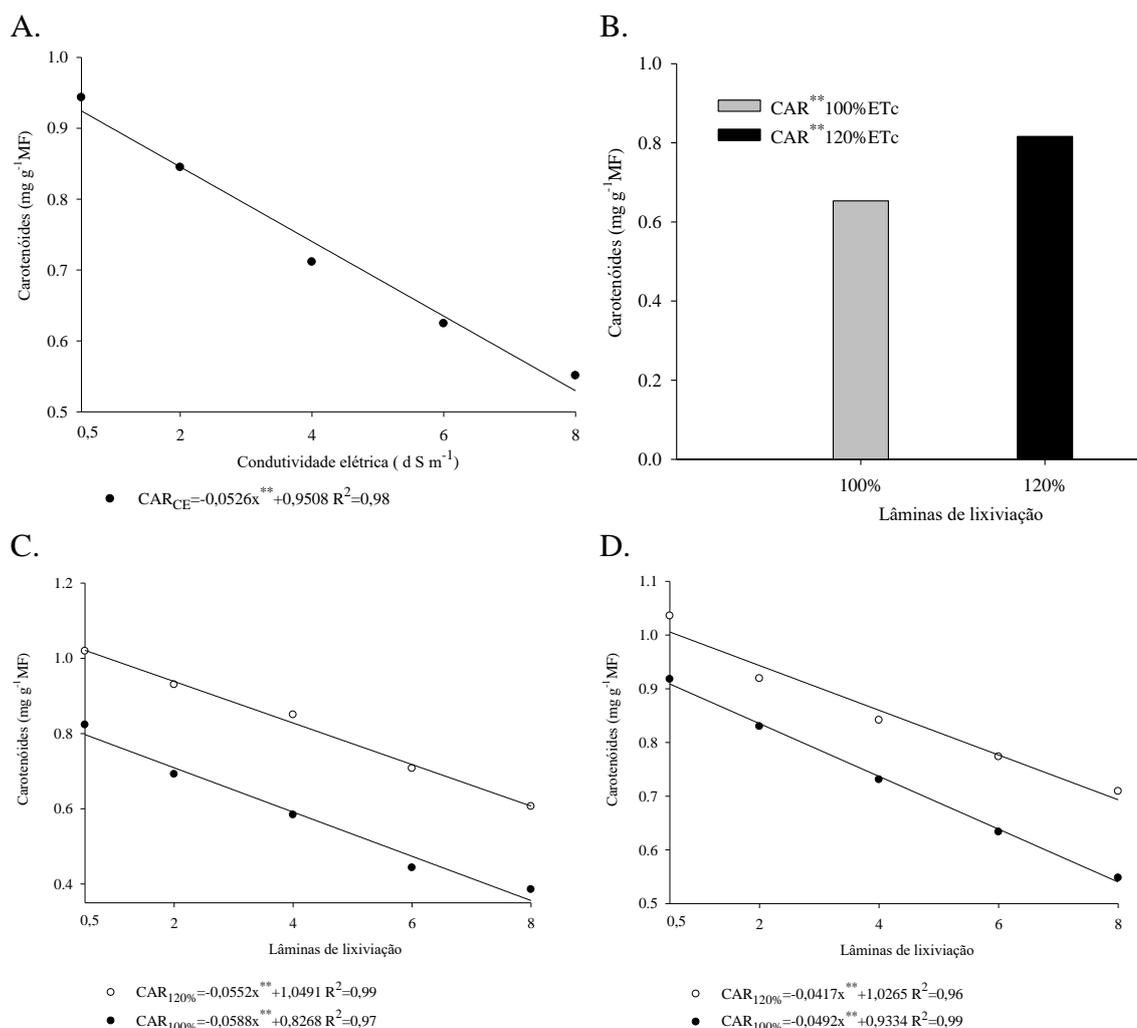


Figura 4. Teor de Carotenóides da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE. 150 DAS (salinidade, A), 150 DAS (lâminas, B), 210 DAS (C); 270 DAS (D).

Aos 210 DAS (Figura 4 C) observa-se o efeito da interação da salinidade com as lâminas de lixiviação com efeito linear decrescente ($p < 0,01$) a medida que se incrementou os níveis salinos. Na lâmina de 100% da ETC, obteve-se valores médios de teor de carotenóides na ordem de 0,8232 e 0,3853 mg g⁻¹ MF (-53,19%) e para a lâmina de 120% ETC valores de 1,0192 e 0,6062 mg g⁻¹ MF (-40,52) correspondendo aos níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹.

Aos 270 DAS (Figura 4 D) apresentou efeito linear decrescente ($p < 0,01$), para a interação salinidade com as lâminas de lixiviação, de forma similar a leitura anterior ocorreu redução nos teores médios de carotenóides. Os teores médios para a lâmina de 100% ETC foram de 0,9177 e 0,5479 mg g⁻¹ MF correspondentes aos níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, promovendo uma redução de 40,29% e para lâmina de 120% ETC valores de 1,0356 e 0,7090 mg g⁻¹ MF (-31,53%) correspondendo aos níveis de salinidade

de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹. A fração de lixiviação promoveu uma maior retirada dos sais da zona do sistema radicular das plantas, os quais foram lixiviados na solução drenada dos lisímetros referentes a este tratamento, reduzindo a intensidade do estresse salino.

De acordo com Medeiros et al. (2010), o uso de águas salinizadas na agricultura, sempre deve estar associado a práticas de manejo como uso de lâminas excedentes (fração de lixiviação), para lixiviação dos sais do solo, que permite um equilíbrio favorável dos íons na zona radicular da cultura.

3.4 Catalase (CAT)

Na Figura 5 A, observa-se o efeito significativo isolado para o fator salinidade para a Catalase (CAT), com resposta quadrática com aumento até 6,31 dS m⁻¹ ($p < 0,01$) aos 150 DAS. No entanto, a partir da salinidade da água de irrigação de 6,31 dS m⁻¹ onde o estresse salino atinge se o nível máximo ocorre uma redução da Catalase, evidenciando que o este mecanismo de defesa ao estresse oxidativo já não consegue mais mitigar os efeitos do estresse salino.

Os resultados corroboram com os obtidos por Carvalho et al. (2016) para a variedade RB 92579 submetida a estresse salino (NaCl) de 6 dS m⁻¹ em estágio inicial de crescimento. De acordo com Azevedo et al. (2011), a capacidade de ativação do sistema antioxidante é um dos principais mecanismos que permitiu a planta tolerar o estresse oxidativo.

Aos 210 DAS (Figura 5 B), o efeito similar a coleta anterior (150 DAS), com resposta quadrática com aumento até 6,98 dS m⁻¹ ($p < 0,01$), porém com valores maiores em consequência da duração do estresse, apresentando os valores médios de 412,22 e 613,64 $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ (mg MF min⁻¹)⁻¹ para as condutividades elétricas de 0,5 e 6,98 dS m⁻¹, respectivamente, o que representa um aumento percentual de 32,83.

Na Figura 5 C, observa-se o efeito da interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação e as lâminas de lixiviação para a catalase (aos 270 DAS). Houve um aumento da catalase em função do incremento de salinidade da água de irrigação, com efeito significativo ($p < 0,01$) quadrático para as duas lâminas de lixiviação (100% e 120% ETc).

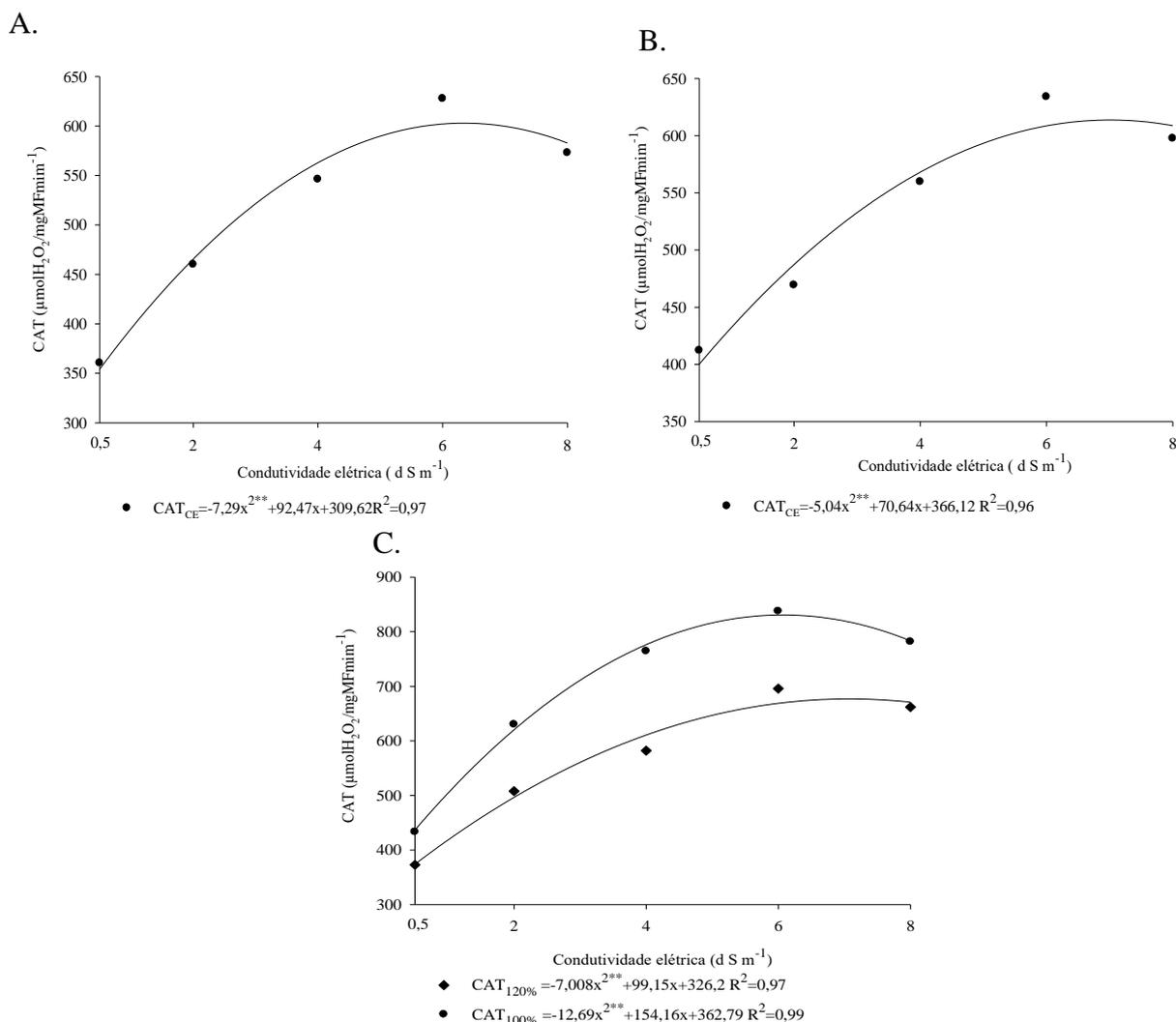


Figura 5. Catalase da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A), 210 DAS (B) e 270 DAS (C).

Para lâmina de 100% ETc os valores médios para Catalase foram de 433,27 e 830,98 $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 (\text{mg MF min}^{-1})^{-1}$ para as condutividades elétricas de 0,5 e 6,06 dS m^{-1} respectivamente, redução de 47,86%. No entanto, a partir da salinidade da água de irrigação de 6,06 dS m^{-1} , onde ocorreu a maior redução da síntese de Catalase, evidenciando que a capacidade da enzima em degradar as espécies reativas de oxigênio (EROs) já não consegue reduzir os efeitos do estresse salino. Além disso, observa-se que a fração de lixiviação (0,17) promoveu uma redução da catalase de 44,74% (7,06 dS m^{-1}), demonstrando a eficiência da fração de lixiviação (0,17) em amenizar os efeitos do estresse salino.

O mecanismo de defesa enzimático é composto pelo sistema SOD-CAT-APX, que atuam de forma coordenada para promover o equilíbrio redox no meio celular que é perturbado pelo acúmulo dos EROs (MUNNS & TESTER, 2008; PATADE & SUPRASANNA, 2009; ANITHA et al., 2015).

A dismutase do superóxido (SOD) constitui a primeira linha de defesa em condição de estresse, no entanto, estudos realizados por Willadino et al. (2011) com as variedades RB 92579, RB867515 e RB863129 submetidas a estresse salino, observaram resposta inversa dessa enzima ao incremento da salinidade. Desse modo, as Catalases passam a ser o principal mecanismo de eliminação, atuando na eliminação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) nos peroxissomos, produzido pela atividade da enzima oxidase do glicolato (GO) na via fotorrespiratória (BAUWE et al., 2012; ZHANG et al., 2016).

Na Figura 6 A, observa-se o efeito isolado das lâminas de irrigação (com e sem fração de lixiviação) sobre a Catalase da cana de açúcar (150 DAS). Houve um incremento significativo ($p < 0,01$) de 24,72% na Catalase devido ao efeito acentuado do estresse salino, com os valores de 601,21 e 452,59 $\mu\text{mol } H_2O_2 \text{ (mg MF min}^{-1})^{-1}$ correspondentes as lâminas de 100% e 120% da ETC, respectivamente. A fração de lixiviação proporcionou uma maior retirada dos sais da zona do sistema radicular das plantas, os quais foram lixiviados na solução drenada dos lisímetros referentes a este tratamento, reduzindo a intensidade do estresse salino.

A CAT, apesar de ter baixa afinidade pelo H_2O_2 requerendo a ligação de duas moléculas dessa ROS para que a reação ocorra, é provavelmente a principal responsável pela remoção do excesso do H_2O_2 em condições mais severas de estresse (SOUZA et al., 2015; ZHANG et al., 2016), justificando assim, a maior atividade desta enzima nas plantas submetidas ao estresse salino sem fração de lixiviação obtida neste estudo.

Aos 210 DAS (Figura 6 B), o comportamento foi similar ao observado aos 150 DAS, no entanto, valores menores devido a cultura estar iniciando sua fase de maturação, apresentando os valores de 583,00 e 459,18 $\mu\text{mol } H_2O_2 \text{ (mg MF min}^{-1})^{-1}$ (-21,23%) correspondentes as lâminas de 100% e 120% da ETC, respectivamente. Quanto menor o estresse, menor a atividade dessas enzimas, como relatado por Azevedo (2013).

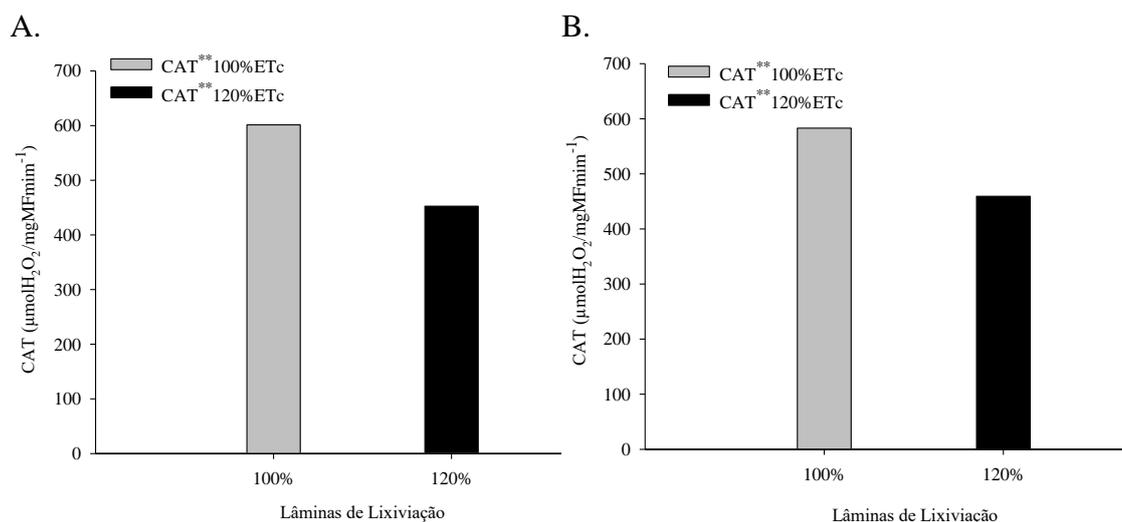


Figura 6. Catalase da cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A) e 210 DAS (B).

3.5 Ascorbato peroxidase (APX)

Na Figura 7 A, observa-se o efeito da interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação e as lâminas de lixiviação para a Ascorbato peroxidase (APX) (aos 150 DAS). Houve um aumento da APX em função do incremento de salinidade da água de irrigação, com efeito significativo quadrático ($p < 0,01$) para as duas lâminas de lixiviação (100% e 120% ETc).

Diferente da SOD e da CAT, as peroxidases do ascorbato (APX) usam o ascorbato (ASA) como doador de elétrons para converter o H_2O_2 em H_2O e O_2 em diversos compartimentos celulares (NISHIYAMA & MURATA, 2014). As APXs possuem uma alta afinidade pelo peróxido, identificando-o mesmo concentrações muito baixas, podendo ser responsável por modular processos de sinalização (MITTLER, 2002).

Para lâmina de 100% ETc o valor máximo do teor de APX foi de $34054,09 \mu\text{mol } H_2O_2 \text{ (mg MF min}^{-1}\text{)}^{-1}$ para as condutividade elétrica de $7,27 \text{ dS m}^{-1}$ respectivamente, redução percentual de 46,15% em relação ao menor nível salino. No entanto, a partir da salinidade da água de irrigação de $7,27 \text{ dS m}^{-1}$, onde o estresse salino atinge se nível máximo ocorre uma redução da síntese de catalase, evidenciando que a capacidade da enzima em degradar as espécies reativas de oxigênio já não consegue reduzir os efeitos do estresse salino.

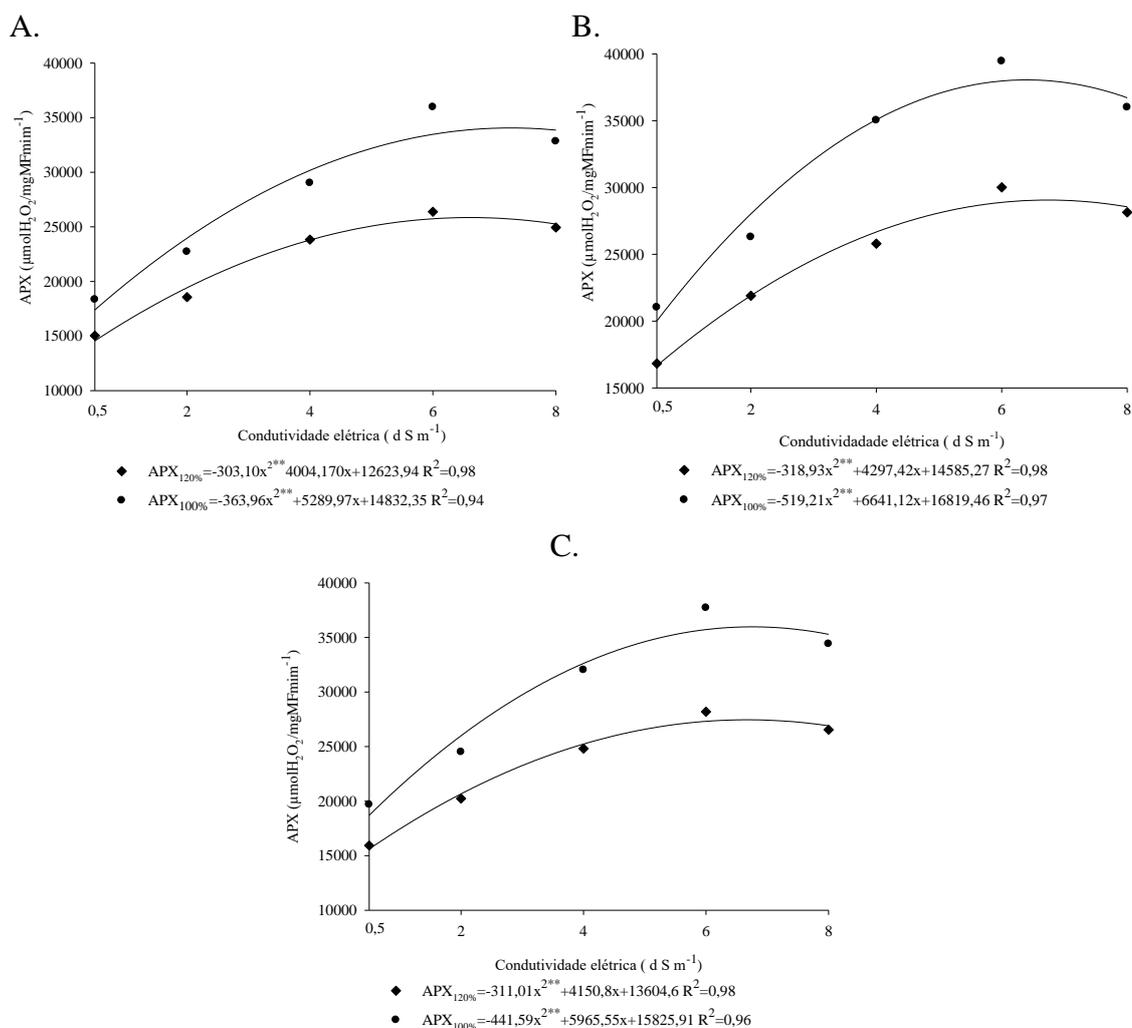


Figura 7. Ascorbato Peroxidase na cana-de-açúcar (RB92579), submetida a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação ao longo de um ciclo (Cana planta) em Recife, PE, aos 150 DAS (A), 210 DAS (B) e 270 DAS (C).

Os resultados corroboram com os obtidos por Carvalho et al. (2016). Silva (2010) em estudos com seis genótipos de cana submetidos estresse hídrico severa, observou aumento de até 30,23% na atividade APX.

Na lâmina de lixiviação, houve redução percentual da APX de 41,82% ($6,61 \text{ dS m}^{-1}$), demonstrando a eficiência da fração de lixiviação (0,17) em amenizar os efeitos do estresse salino.

Quando comparada com a coleta anterior (150 DAS) a Figura 7 B (210 DAS) se observar valores em uma intensidade maior, devido ao acúmulo de sais nos lisímetros que aumentam a duração do estresse e conseqüentemente sua intensidade.

Também é observado o efeito da interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação e as lâminas de lixiviação para a Ascorbato peroxidase (APX) (aos 210 DAS). Houve um aumento da APX em função do incremento de salinidade da água de irrigação,

com efeito significativo ($p < 0,01$) quadrático para as duas lâminas de irrigação (100% e 120% ETc).

Para lâmina de 100% ETc os valores médios foram de 21027,16 e 38055,79 $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ (mg MF min^{-1})⁻¹ (+55,25%) para as condutividades elétricas de 0,5 e 6,40 dS m^{-1} respectivamente. No entanto, a partir da salinidade da água de irrigação de 6,40 dS m^{-1} , onde o estresse salino atinge se nível máximo ocorre uma redução da síntese de catalase, evidenciando que a capacidade da enzima em degradar as espécies reativas de oxigênio já não consegue reduzir os efeitos do estresse salino. Além disso, observa-se que na lâmina de lixiviação a maior atividade da APX foi observada no nível de salinidade de 6,74 dS m^{-1} (+42,08%), no entanto, com valores médios mais reduzidos quando comparada aos tratamentos sem fração de lixiviação.

Na Figura 7 C, observa-se o efeito da interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação e as lâminas de lixiviação para APX (aos 270 DAS). Houve um aumento da APX em função do incremento de salinidade da água de irrigação, com efeito significativo ($p < 0,01$) quadrático crescente para as duas lâminas de lixiviação (100% e 120% ETc).

Para lâmina de 100% ETc apresentou os valores médios de 19681,48 e 37441,95 $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ (mg MF min^{-1})⁻¹ para as condutividades elétricas de 0,5 e 7,25 dS m^{-1} respectivamente, aumento percentual de 47,43% entre os valores indicados. No entanto, a partir da salinidade da água de irrigação de 7,25 dS m^{-1} , onde o estresse salino atinge se nível máximo ocorre uma redução da síntese de catalase, evidenciando que a capacidade da enzima em degradar as espécies reativas de oxigênio já não consegue reduzir os efeitos do estresse salino. Além disso, observa-se que a lâmina de lixiviação houve aumento percentual da atividade da APX de 41,96, com maior valor de 27453,90 $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ (mg MF min^{-1})⁻¹ na salinidade de 6,67 dS m^{-1} . Quintela et al. (2015), avaliando a tolerância da cana-de ao estresse hídrico (seca), observaram um aumento da atividade APX.

4. CONCLUSÕES

Os pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*, *b* e carotenóides) apresentaram uma redução em sua quantidade à medida que se incrementou os níveis de salinidade, demonstrando que o estresse salino interfere na síntese e degradação dos pigmentos.

As enzimas apresentaram efeito crescente à medida que se incrementou os níveis salinos, mas ambas tiveram seu ponto de máxima na faixa de salinidade 6,06 a 7,27 dS m^{-1} , onde a partir deste valor ocorreu um decréscimo na quantidade enzimática,

demonstrando que o estresse estava muito severo e que a quantidade de enzimas não estava dando conta de degradar todas as espécies reativas de oxigênio.

A fração de lixiviação de 0,17 apresentou a capacidade de reduzir os efeitos deletérios dos sais sobre as plantas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFCP - ASSOCIAÇÃO DOS FORNECEDORES DE CANA DE PERNAMBUCO. **Irrigação da cana no Nordeste: panorama de 2015.** Disponível em: <<http://www.afcp.com.br/?p=18551>>. Acesso em: 14/06/2018.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's Climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2014.

ANITHA, R.; MARY, P. C. N.; SAVERY, M. A. J. R.; SRITHARAN, N.; PURUSHOTHAMAN, R. S. Differential responses of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) genotypes under salt stress condition. **Plant Archive**, v.15, n.2, p.1055-1060, 2015.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Qualidade da água na agricultura.** Campina Grande: UFPB, 1999. 153p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).

AZEVEDO, R. A.; CARVALHO, R. F.; CIA, M. C.; GRATÃO, P. L. Sugarcane under pressure: An overview of biochemical and physiological studies of abiotic stress. **Tropical Plant Biology**, v.4, p.42-51, 2011.

AZEVEDO, V. M. **Ação combinada de fatores abióticos de estresse em cana-de-açúcar: variáveis fisiológicas e bioquímicas.** 2013. 57p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

BARROS, A. H. C. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica: Árvore do conhecimento: Território Mata Sul Pernambucana - Clima.** Disponível: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000fbz2ztdp02wx5eo0sawqe3h6815n4.html>. Acesso em: 03/10/2016.

BAUWE, H., HAGEMANN, M., FERNIE, A. R. Photorespiration: players, partners and origin. **Trends in Plant Science**, v.15, p. 330-336, 2010.

BAUWE, H.; HAGEMANN, M.; KERN, R.; TIMM, S. Photorespiration has a dual origin and manifold links to central metabolism. **Current Opinion in Plant Biology**, v.15, p. 269-275, 2012.

BEERS, R. F. JR.; SIZER, I. W. A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase. **Journal of Biological Chemistry**, p.133-140, 1952.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 611p.

BHATTACHARJEE, S. Sites of generation and physicochemical basis of formation of reactive oxygen species in plant cell. **In: GUPTA, S.D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants**. Enfield: Science Publishers, p.1-30, 2010.

CARVALHO, F. E. L. et al. Aclimação ao estresse salino em plantas de arroz induzida pelo pré-tratamento de H₂O₂. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.416-423, 2011.

CARVALHO, M. F. et al. Enzymatic activity of three sugarcane varieties under salt stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.9, p.806-810, 2016.

CAVALCANTI, F. J. A. et al. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2ª ed. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco, 2008. 198p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v.5 - Safra 2018/2019, n.1 - Primeiro Levantamento**. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 08/06/2018.

DINAKAR, C. et al. Photosynthesis in desiccation tolerant plants: energy metabolism and antioxidative stress defense. **Plant Science**, v.182, p.29-41, 2012.

DJANAGUIRAMAN, M. et al. Rice can acclimate to lethal level of salinity by pretreatment with sublethal level of salinity through osmotic adjustment. **Plant Soil**, v.284, p. 363-373, 2006.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011. 212p.

FATIBELLO-FILHO, O.; VIEIRA, I. C. Uso analítico de tecidos e de extratos brutos vegetais como fonte enzimática. **Química Nova**, v.25, n.3, p.455-464, 2002.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

GERÔNIMO, G. Z. **Características morfofisiológicas e agrupamento genético de cana-de-açúcar sob deficiência hídrica**. 2014. 81 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Botucatu.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15ª ed. Piracicaba: ESALQ, 2009. 451 p.

GOMES, M. A. C.; SUZUKI, M. S.; CUNHA, M.; TULLII, C. F. Effect of salt stress on nutrient concentration, photosynthetic pigments, proline and foliar morphology of *Salvinia auriculata* Aubl. **Acta Limnologia Brasiliensia**, v.23, n.2, p.164-176, 2011.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normal Climatológica do Brasil 1981-2010**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 03/06/2018.

KAR, M.; MISHRA, D. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. **Plant Physiology**, v.57, p.315-319, 1976.

KIM, Y. H.; KWAK, S. S. The role of antioxidant enzymes during leaf development. In: GUPTA, S. D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. Enfield: Science Publishers, p.129-150, 2010.

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

LIMA, B. L. C. **Respostas fisiológicas e morfométricas de mudas de coqueiro anão irrigado com águas salinas**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MALAVOLTA, E. et al. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MEDEIROS, J. F.; NASCIMENTO, L. B.; GHEYI, H. R. Manejo do solo-água em áreas afetadas por sais. **In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Ed.). Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2010. p. 279-302.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v.7, n.9, p.405-410, 2002.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v.7, p.405-410, 2002.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.651-681, 2008.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-specific Peroxidase in Spinach chloroplasts. **Plant Cell Physiology**, v. 22, p.867-880, 1981.

NISHIYAMA, Y.; MURATA, N. Revised scheme for the mechanism of photoinhibition and its application to enhance the abiotic stress tolerance of the photosynthetic machinery. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.98, p. 8777-8796, 2014.

PATADE, V.Y.; BHARGAVA, S.; SUPRASANNA, P. Salt and drought tolerance of 4 sugarcane under iso-osmotic salt and water stress: growth, osmolytes accumulation, 5 and antioxidant defense. **Journal of Plant Interactions**, v.6, p.275-282, 2011.

QUINTELA, M. P.; PEDROSA, E. M. R.; WILLADINO, L. A.; ROLIM, M. M.; SILVA, E. F. F.; DAVID, M. F. L.; Intensity and duration of water deficit on the pathosystem sugarcane x *Meloidogyne incognita*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.581-586, 2015.

SILVA, A. R.; BEZERRA, F. M. L.; LACERDA, C. F.; SOUSA, C. H. C.; CHAGAS, K. L. Pigmentos fotossintéticos e potencial hídrico foliar em plantas jovens de coqueiro sob estresses hídrico e salino. **Revista Agro@mbiente**, v.10, n.4, p.317-325, 2016.

SILVA, M. A.; SANTOS, C. M.; VITORINO, H. S.; RHEIM, A. F. L. Pigmentos fotossintéticos e índice spad como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, v.30, n.1, p.173-181, 2014.

SILVA, P. B. **Aspectos fisiológicos de seis genótipos de cana-de-açúcar submetidos a estresse hídrico**. 2010. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo.

SILVEIRA, J. A. G.; SILVA, E. N.; SILVA, S. L. F.; VIÉGAS, R. A. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. **In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, p.303-317, 2010.

SINDAÇÚÇAR. **Acompanhamento da produção sucroalcooleira: Safra 2017/2018**. Disponível em: <http://www.sindacucar.com.br/arquivos/estatisticas/Acompanhamento_da_producao_Nordeste_16_05_2018_Safra2017_18_MAPA.PDF> Acesso em: 14/06/2018.

SOUSA, R. H.; CARVALHO, F. E.; C. W.; PASSAIA, G.; CUNHA, J. R.; LIMA-MELO, Y.; MARGIS-PINHEIRO, M.; SILVEIRA, J. A. Peroxisomal APX knockdown triggers antioxidant mechanisms favourable for coping with high photorespiratory H₂O₂

induced by CAT deficiency in Rice. **Plant, Cell and Environment**, v.38, p.499-513, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 5. ed., 2013. 954p.

TARGINO, H. C. O.; SILVA, J. A. B.; SILVA, E. P.; AMORIM, M. N.; SEABRA, T. X. Soil salinization and its effects on morpho-physiological characteristics of sugarcane varieties. **Revista Geama**, v.3, n.4, p.184-190, 2017.

WILLADINO, L.; OLIVEIRA FILHO, R. A.; SILVA JUNIOR, E. A.; GOUVEIA NETO, A.; CAMARA, T. R. Estresse salino em duas variedades de cana-de-açúcar: enzimas do sistema antioxidativo e fluorescência da clorofila. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.2, p.417-422, 2011.

ZHANG, Z. et al. Association-Dissociation of Glycolate Oxidase with Catalase in Rice: A Potential Switch to Modulate Intracellular H₂O₂ Levels. **Molecular Plant**, v. 9, p. 737-748, 2016.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos desta pesquisa, pode-se inferir as seguintes considerações finais:

Ficou claro a importância do conhecimento da resposta bioquímica da planta em relação ao estresse salino, visto que a utilização e seleção de variedades tolerantes possibilita uma maior eficiência em campo, como a possibilidade de produzir cana-de-açúcar com águas de qualidade inferior.

As concentrações de enzimas podem servir como indicadores de estresse visto que a sua quantidade é aumentada com a severidade do estresse, como neste trabalho na faixa de 6,06 a 7,27 dS m⁻¹. Esses valores encontram-se acima da salinidade limiar da cana-de-açúcar (1,7 dS m⁻¹) demonstrando eficiência na produção de enzimas para tolerar o estresse. Para um próximo trabalho fica a sugestão de utilizar níveis salinos maiores, visto que os valores máximos ficaram em torno de 7,0 dS m⁻¹ valor muito próximo do extremo avaliado neste experimento 8,0 dS m⁻¹, poderia ser utilizado os seguintes níveis (0,5; 3,0; 6,0; 9,0 e 12 dS m⁻¹) para avaliar o comportamento bioquímico.

A maior eficiência da lâmina de lixiviação é obtida quando associada a um sistema de drenagem, permitindo a manutenção do equilíbrio iônico e do potencial osmótico no sistema radicular da cultura pela remoção dos sais.

As trocas gasosas (A , E , g_{sw} e Ci), potencial hídrico, pigmentos fotossintéticos (clorofila a e b , carotenoides) foram maiores para os tratamentos com fração de lixiviação mesmo nos maiores níveis de salinidade da água de irrigação, parâmetros estes diretamente relacionados ao desenvolvimento vegetativo, produtividade dos colmos e açúcar, validando a hipótese específica: O uso da fração de lixiviação promoverá uma redução do efeito da salinidade, aumentando as trocas gasosas (A , E , g_{sw} e Ci), e o estado hídrico da folha (potencial hídrico). Uma redução do estresse oxidativo, apresentando menor teor de enzimas.