



**ADRIANA CONCEIÇÃO DA SILVA**

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E AGROINDUSTRIAIS DE  
CLONES DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB CULTIVO DE  
SEQUEIRO**

**TERESINA – PI**

**2020**

**ADRIANA CONCEIÇÃO DA SILVA**

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E AGROINDUSTRIAIS DE CLONES DE CANA-DE-AÇÚCAR  
SOB CULTIVO DE SEQUEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura Tropical, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

**ORIENTADOR**

Prof. Dr. Francisco de Alcântara Neto

**COORIENTADORES**

Profa. Dra. Aurenívia Bonifácio

Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior

**TERESINA-PI**

**2020**

FICHA CATALOGRÁFICA  
Universidade Federal do Piauí  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Agrárias  
Serviço de Processos Técnicos

S586a Silva, Adriana Conceição da.  
Aspectos fisiológicos e agroindustriais de clones de cana-de-açúcar  
sob cultivo de sequeiro / Adriana Conceição da Silva. -- 2020.  
90 f. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Centro de  
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia -  
Agricultura Tropical, Teresina, 2020.

“Orientador: Prof. Dr. Francisco de Alcântara Neto.”

“Coorientadores: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aurenívia Bonifácio, Dr. Aderson  
Soares de Andrade Júnior.”

1. Cana-de-açúcar – Aspectos fisiológicos. 2. Cana-de-açúcar –  
Cultivo - Piauí. 3. *Saccharum spp.* I. Alcântara Neto, Francisco de.  
II. Bonifácio, Aurenívia. III. Andrade Júnior, Aderson Soares de.  
IV. Título.

CDD 633.61


**ADRIANA CONCEIÇÃO DA SILVA**

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E AGROINDUSTRIAIS DE CLONES DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB  
CULTIVO DE SEQUEIRO**

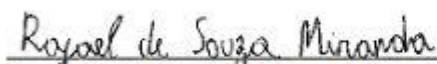
Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Agricultura Tropical, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

APROVADA em 30 de julho de 2020.

Comissão Julgadora:



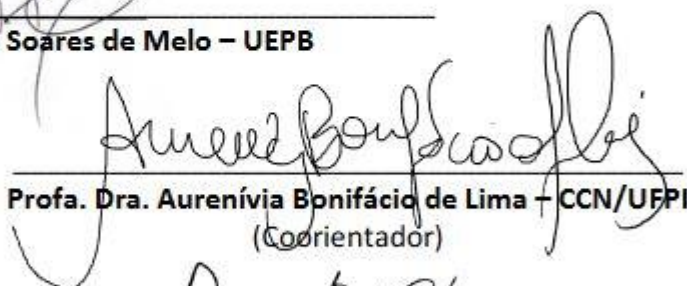
**Prof. Dr. Ademir Sérgio Ferreira de Araújo – CCA/UFPI**



**Prof. Dr. Rafael de Souza Miranda – CPCE/UFPI**



**Prof. Dr. Alberto Soares de Melo – UEPB**



**Profa. Dra. Aurenívia Bonifácio de Lima – CCN/UFPI**  
(Coorientador)



**Prof. Dr. Francisco de Alcântara Neto – CCA/UFPI**  
(Orientador)

**TERESINA-PI**

**2020**

*A Deus que sempre esteve comigo, dando-me forças nesta jornada.*

**OFEREÇO**

*“Dedico o presente trabalho a minha mãe Francisca Filomena, que foi meu maior apoio nos momentos de angústia. Também quero homenagear meu pai Antônio Joaquim (in memoriam), por sempre me incentivar e acreditar que eu seria capaz de superar os obstáculos que a vida apresentar.*

*(DEDICO)*

## AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor do meu destino, meu guia e socorro presente nas horas de aflições.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Piauí, pela oportunidade em realizar meu doutoramento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu pai Antônio Joaquim da Silva (*in memoriam*) e minha mãe Francisca Filomena da Conceição, minhas irmãs Andréa e Maria Aparecida que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para eu chegar até esta etapa da vida. Aos meus sobrinhos Antônio Neto e Ana Maitê que respeitaram meus momentos de reclusão, obrigado pelo carinho;

Ao Prof. Dr. Francisco de Alcântara Neto pela orientação e todos os ensinamentos, por exigir muito mais do que eu imaginava ser capaz de fazer, manifesto aqui minha gratidão eterna por compartilhar sua sabedoria, seu tempo e sua experiência.

Aos meus coorientadores Profa. Dra. Aurenívia Bonifácio e Dr. Aderson Soares de Andrade Junior, pelos ensinamentos científicos, paciência, colaboração nos experimentos e amizade.

Aos professores Gabriel Barbosa da Silva Júnior, Carlos Humberto Aires Matos Filho e Rafael de Sousa Miranda pela colaboração científica nos experimentos, além das sugestões e contribuições oferecidas nesse trabalho.

A todos que fizeram e fazem parte do PMGCA-UFPI, em especial, à Leudimar Aires Pereira pela ajuda nas determinações bioquímicas, e ao Sr. Renê Moura que por algumas vezes foi o responsável pelo nosso traslado à COMVAP.

Aos estudantes de Iniciação Científica que me acompanharam na condução dos experimentos: Abel, Ananda, Ruan e Fredson, minha gratidão eterna.

À Usina Comvap e a todo Grupo Olho D'água, por ter disponibilizado a área para realização do experimento, bem como de seus funcionários, em especial ao Sr. Sebastião Rodrigues de Oliveira (Tião) que sempre acompanhou de perto todas as atividades em campo.

A todos os Professores do Programa de Pos-Graduação em Agronomia/Produção Vegetal pelos ensinamentos e incentivos.

Aos amigos do Departamento de Fitotecnia, em especial ao secretário Sebastião Silva Chaves pelas caronas, aos dias de convivência e conselhos, a dona Francisca das Chagas Silva, pelos cafés na volta do RU, pela amizade e dias de convivência sempre muito agradáveis.

Aos funcionários da EMBRAPA Meio - Norte, em especial Diego, Gustavo, além dos estagiários: Gabriela Sabrine, Geania de Sousa, Alcilane Arnaldo, Ane Caroline, Smaiello Flores, Alzeneide da Silva e Eduardo Magno.

Às grandes pessoas com quem dividi apartamento, em especial a amiga Arlete e seu filho Gabriel, que hoje me consideram parte da família. A Prof. Dra. Solange e seu esposo Prof. Dr. Maruzanete, ao tempo superdivertido que dividimos apartamento, as aventuras, saídas, enfim todo o aprendizado obtido pela convivência com esses seres abençoados. A Lucielma e Sanches pelo convívio nesse período final do doutorado, minha gratidão a todos.

Ao pessoal do grupo caça e pesca: Jayara Dayany, Mírya Grazielle, Claudyanne do Nascimento, Rodrigo Brito e Welder José, pelos dias divertidos desde o início do doutorado até os dias atuais, pessoas com quem quero compartilhar da amizade pelo resto da vida.

Aos amigos do programa de genética e melhoramento e do laboratório de sementes: Gerson Nascimento, Rafael Almeida, Antônia Batista, Marilha Vieira, Jéssica Lustosa, Dra. Verônica, Petronílio Eduardo, Gisele, Manuel Brás, meu muito obrigado.

Aos amigos do PPGA: Marcus Willame, Enayra, Mariane Pertille, Vicente Paulo, João Pedro, José Cláudio, Janaína Barros, Emanoela Sousa, Mayara Fernandes, minha eterna gratidão. Aos amigos: Leila Pereira, Juciene Paiva, Mateus Ferreira, enfim a todos os amigos que conquistei no decorrer desta caminhada, obrigada pelos inúmeros conselhos, frases de motivação, risos que compartilharam comigo nessa etapa tão desafiadora da vida acadêmica, e fizeram toda diferença.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Minha eterna gratidão!!!

## RESUMO GERAL

O déficit hídrico é um dos componentes ambientais que mais limita a produção da cana-de-açúcar, principalmente em áreas não irrigadas onde a restrição hídrica ocorre em períodos de pleno crescimento e desenvolvimento da cultura. O acúmulo de osmorreguladores em resposta a essa limitação torna-se um mecanismo importante para manter o turgor celular, mitigando a redução do potencial hídrico. Este estudo teve como objetivo avaliar clones de cana-de-açúcar sob cultivo de sequeiro no principal polo de cultivo de cana-de-açúcar do Estado do Piauí, com base em parâmetros biométricos, bioquímico-fisiológicos, tecnológicos e de produtividade. Dividido em capítulos, o estudo abordou o referencial teórico no capítulo I e, no capítulo II, tratou de investigar a eficiência fotossintética e regulação osmolítica na tolerância de seis clones de cana-de-açúcar (RB975375, RB006629, RB955977, RB011549, RB064109 e RB064125) e duas variedades comerciais (RB867515 e RB92579) cultivados em condições semiáridas. Os clones RB975375, RB006629, RB064109, e RB064125, sob cultivo com limitação hídrica, exibiram melhor crescimento e resposta às trocas gasosas e osmóticas. Os clones RB975375 e RB064109 apresentam alta eficiência no uso da água, refletindo melhor rendimento de colmo e açúcar comparado às variedades RB867515 e RB92579. O capítulo III versou sobre os osmoprotetores e rendimento tecnológico em clones de cana-de-açúcar cultivados em ambientes com limitação de água, que teve como objetivo avaliar a variação temporal da concentração de carboidratos e a produtividade dos clones de cana cultivados em ambiente de sequeiro, em dois ciclos de cultivo (2017/18 e 2018/19). Foram avaliados os clones RB975375, RB021754, RB955977, RB064125, RB006995, RB068027 e duas variedades comerciais (RB867515 e RB92579). Os clones RB021754, RB064125, RB068027, RB006995 e RB975375 apresentam expressivo acúmulo de osmoprotetores sob restrição hídrica, no entanto os clones RB068027 e RB975375 apresentaram alta eficiência de uso da água nos ciclos cana-planta e cana-soca, além de maior rendimento de colmo e açúcar.

**Palavras Chave:** Carboidratos, déficit hídrico, eficiência do uso da água, prolina, *Saccharum spp.*



## ABSTRACT

Water deficit is one of the environmental components that most limits sugarcane production, especially in non-irrigated areas where water restriction occurs during periods of full growth and crop development. The accumulation of osmoregulators in response to this limitation becomes an important mechanism to maintain cell turgor, mitigating the reduction in water potential. This study aimed to evaluate sugarcane clones under rainfed cultivation in the main sugarcane cultivation pole in the Brazilian state of Piauí, based on biometric, biochemical, physiological, technological and productivity parameters. Divided into chapters, the study addressed the theoretical framework in Chapter I, and in Chapter II it investigated the photosynthetic efficiency and osmolytic regulation in the tolerance of six sugarcane clones (RB975375, RB006629, RB955977, RB011549, RB064109 and RB064125) and two commercial varieties (RB867515 and RB92579) grown in semi-arid conditions. Clones RB975375, RB006629, RB064109, and RB064125, under cultivation with water limitation, exhibited better growth and response to gas and osmotic exchanges. Clones RB975375 and RB064109 showed high efficiency in the use of water, reflecting better stalk and sugar yields compared to varieties RB867515 and RB92579. Chapter III evaluated osmoprotectors and technological performance in sugarcane clones grown in water-limited environments, which aimed to evaluate the temporal variation of carbohydrate concentrations and the productivity of sugarcane clones grown in rainfed environments.

**Keywords:** Carbohydrates, water deficit, water use efficiency, proline, *Saccharum* spp.

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo II

- Figure 1.** Rainfall, evapotranspiration of reference and air temperature (minimum, average and maximum) throughout the sugarcane crop cycle (April 2017 to June 2018) .....59
- Figura 2.** Temporal variation of soil moisture at depths 0.1 to 0.6 m along the sugarcane crop cycle. Phase I = Sprouting. Phase II = Tillering. Phase III = Vegetative growth. Phase IV = Maturation. FC = Field capacity. PWP = Permanent withering point. HC = Critical humidity.....60
- Figura 3.** CO<sub>2</sub> assimilation rate (A), transpiration rate (B), stomatal conductance (C) and internal CO<sub>2</sub> concentration (D) of commercial (RB867515 and RB92579) and promising sugarcane clones at 90 days after planting (under drought). Different capital letters represent significant difference between sugarcane clones (Scott Knott' test;  $p < 0.05$ ) .....61
- Figura 4.** Instantaneous water-use efficiency (A), intrinsic water use efficiency (B) and instantaneous carboxylation efficiency (C) of commercial (RB867515 and RB92579) and promising sugarcane clones at 90 days after planting (under drought). Different capital letters represent significant difference between sugarcane clones (Scott Knott' test;  $p < 0.05$ ) .....62
- Figura 5.** Principal component analyses with gas exchange variables measured at 90 days after planting in commercial (RB867515 and RB92579) and promising sugarcane clones. The vectors indicate the direction and strength of each analyzed variable for the general distribution. A = CO<sub>2</sub> assimilation rate. T = transpiration rate.  $g_s$  = stomatal conductance.  $C_i$  = internal CO<sub>2</sub> content.  $A/E$  = instantaneous water-use efficiency.  $A/g_s$  = intrinsic water use efficiency.  $A/C_i$  = instantaneous carboxylation efficiency.....63
- Figura 6.** Plant height (A), stem diameter (B) and leaf area index (C) of commercial (RB867515 and RB92579) and promising clones of sugarcane plants evaluated at 90 and 150 days after planting (DAP). Different lowercase and capital letters represent significant difference between sugarcane clones at 60 and 150 DAP, respectively (Scott Knott' test;  $p < 0.05$ ) .....64
- Figura 7.** Total soluble carbohydrates (A), starch (B) and free proline (C) of commercial (RB867515 and RB92579) and promising clones of sugarcane plants evaluated at 60 DAP (before the water deprivation) and 150 DAP (in drought). Different lowercase and capital letters represent significant difference between sugarcane clones at 60 and 150 DAP, respectively (Scott Knott' test;  $p < 0.05$ ). DAP = Days after planting.....65

**Figura 8.** Principal component analyses with biometric and biochemical parameters at 150 days after planting in commercial (RB867515 and RB92579) and promising sugarcane clones. The vectors indicate the direction and strength of each analyzed variable for the general distribution. PH = plant height. SD = stem diameter. LAI = leaf area index. TSC = total soluble carbohydrates. ST = starch. PR = free proline.....66

**Capítulo III**

**Figura 1.** Average, maximum and minimum temperatures (°C), precipitation (mm) and reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>), on a monthly scale, during two sugarcane crop cycles (plant cane and ratoon) .....86

**Figura 2.** Temporal variation of soil moisture at depths of 0.10 to 0.60 m during the sugarcane crop cycle and the sugarcane developmental phases. (FC - Field capacity; PWP - Permanent withering point and CH - Critical humidity). .....87

**Figura 3.** Main crop coefficients in the vegetative phases in the 2017/2018 season (plant cane) and 2018/2019 season (ratoon cane). .....88

**Figura 4.** Water use efficiency (WUE) of sugarcane clones under water stress in two seasons of cultivation, corresponding to cane plant (year 1) and first ratoon (year 2) .....89

**Figura 5.** Grouping analysis of proline (Prol), starch (Star), soluble carbohydrates (Carb) and sucrose (Suc) in sugarcane leaves under water-stress conditions at 30 days (A) and 60 days (B), during plant cane (2017/2018 season) and ratoon (2018/2019 season). Each row represents one parameter (Prol, Star, Carb, Suc) and each column represents a sugarcane clone. The data were normalized to the commercial clone RB92579 as the reference plant, indicated as a green color. Relative changes are indicated as increasing the color intensity of the relative compound levels from low to high.....90

**Figura 6.** Principal Component Analysis (PCA) with multivariate variation between sugarcane clones and technological characteristics in the 2017/2018 season (plant cane, A) and 2018/2019 season (ratoon cane, B). The vectors indicate the direction and strength of each variable analyzed for general distribution. Total recoverable sugar (TRS), Fiber% (F), Stalks yield per hectare (SYH), Sucrose contents in the cane - pol% cane (PCC), Apparent juice purity (PZA).....91

## LISTA DE TABELAS

### **Capítulo II**

**Table 1.** Chemical and physical attributes of soil samples at different depths collected in the experimental area before the developing of the experimente .....57

**Table 2.** Technological quality traits and yields of sugarcane clones at the end of experiment (420 days after planting) .....58

### **Capítulo III**

**Table 1.** Chemical and granulometric characteristics of the soil in the experimental area at different depths (0.0-0.2, 0.2-0.4 and 0.4-0.6 m) .....82

**Table 2.** Characterization of phenological phases of sugarcane cultivation in the 2017/2018 (plant cane) and 2018/2019 (ratoon cane) harvest.....83

**Table 3.** Technological quality and productivity of sugarcane clones under water stress conditions in two cultivation seasons, corresponding to plant cane (2017/2018 season) and ratoon (2018/2019 season). The assays of apparent purity, sucrose contents in the cane - pol% cane, fiber content, total recoverable sugar, stalk and sugar were measured at 420 days after planting and 365 and days after cutting.....84

**Table 4.** Sucrose, carbohydrates, starch, and proline contents in the shoot of sugarcane clones grown under hydric stress, evaluated to 30, 60, 150, 180 and 210 DAP and DAC) in plant cane (2017/2018 season) and ratoon cane (2018/2019 season) .....85

**LISTA DE ABREVIATURAS**

**A** - Taxa de Assimilação

**A/CI** - Eficiência Instantânea de carboxilação

**A/E** - Eficiência Instantânea de uso de água

**A/GS** - Eficiência Intrínseco de uso de água

**ATR** - Açúcar Total Recuperável

**CI** - Concentração Interna de Carbono

**COMVAP** - Usina Comvap Açúcar e Álcool

**DAC** – Dias Após o Corte

**DAP** - Dias Após o Plantio

**DAP** - Dias após o plantio

**E** - Transpiração

**ET0** - Evapotranspiração

**EUA** - Eficiência no Uso da Água

**GS** - Condutância Estomática

**Kc** - Coeficiente de Cultivo

**MCW** - Metanol, Clorofórmio e Água

**PCA** - Análise de Componentes Principais

**PCC** - Pol%

**PSII** - Fotossistema II

**PZA** - Pureza Aparente do Suco

**RIDESA** - Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético

**STAR** - Amido

**SUC** - Sacarose

**SYH** - Rendimento de Colmos por Hectare

**TRS** – Açúcar Total Recuperável

**TSC** – Carboidratos Solúveis

**WUE** - Eficiência do Uso de Água

## Sumário

<b>RESUMO GERAL</b> .....	VIII
<b>ABSTRACT</b> .....	IX
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	X
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	XII
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	XIII
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	18
<b>CAPÍTULO I</b> .....	20
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	20
2.1- Importância da cultura da cana-de-açúcar no estado do Piauí .....	20
<b>2.2- Regime de sequeiro</b> .....	20
2.3 - Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar sob restrição hídrica .....	21
2.4 - Deficiência hídrica do solo e o metabolismo do carbono .....	24
2.5 - Mecanismos de tolerância ao déficit hídrico .....	25
2.5.1- Escape .....	27
2.5.2- Retardo .....	27
2.5.3-Tolerância .....	28
2.5.4- Eficiência do uso da água .....	29
2.6 - Acúmulo de osmoprotetores e a limitação hídrica .....	29
<b>3 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	32
<b>CAPÍTULO II</b> .....	40
<b>Photosynthetic efficiency and osmolytic regulation in the tolerance of sugarcane clones grown in semi-arid conditions</b> .....	40
<b>Abstract</b> .....	40
<b>1. Introduction</b> .....	41
<b>2. Materials and Methods</b> .....	42
2.1 Characterization of the experimental area .....	42
2.2 Growth conditions and treatments .....	42
2.3 Gas exchange, plant growth, and biochemical analyses .....	43
2.4 Agro-industrial and yield of sugarcane .....	43
2.5 Statistical analysis .....	43
<b>3. Results</b> .....	44
3.1 Climatic conditions during the experiments .....	44

3.2 Gas exchange responses of sugarcane clones under drought .....	44
3.3 Plant growth and biochemical analyses .....	45
3.4 Agro-industrial attributes and yield of sugarcane clones .....	46
<b>4. Discussion</b> .....	46
4.1 Promising sugarcane clones for water limiting environments.....	46
4.2 Photosynthetic performance of sugarcane clones under water limitation.....	47
4.3 Free proline is a key piece for drought tolerance of sugarcane clones .....	48
4.4 Organic solutes and sugarcane productivity under water deficit .....	48
<b>5. Conclusion</b> .....	49
Acknowledgements .....	49
<b>6. References</b> .....	49
<b>Figure legends</b> .....	53
<b>CAPÍTULO III</b> .....	64
<b>Osmoprotectants and technological yield in sugarcane clones grown in water-limited environments</b> .....	64
<b>ABSTRACT</b> .....	64
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	65
<b>2 - MATERIAL AND METHODS</b> .....	66
2.1 – Experimental conditions .....	66
2.2- Crude extracts.....	67
2.3 – Total soluble carbohydrates, sucrose and starch .....	67
2.4 - Proline content .....	67
2.5 - Total recoverable sugar, stalks productivity and water use efficiency .....	67
2.6 - Statistical analysis .....	68
<b>3 - RESULTS</b> .....	68
3.1 - Water availability in the soil and water use efficiency in sugarcane stems .....	68
3.2 – Time-dependent alterations in carbohydrates and proline.....	69
3.3 - Productivity and total recoverable sugar in sugarcane stems .....	70
<b>4- DISCUSSION</b> .....	71
<b>4.1- Modulation of the carbohydrate metabolism in sugarcane clones grown in under water stress conditions</b> .....	71
4.2 – The role of proline accumulation to alleviate water deficit effects in sugarcane clones under water stress conditions .....	72

4.3. The accumulation of osmoprotectors as an essential mechanism of tolerance to water deficit and productivity in sugarcane plants .....	72
<b>5 - CONCLUSION</b> .....	73
Acknowledgements .....	73
<b>6 - BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES</b> .....	73
<b>Figure legends</b> .....	78
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	89



## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma cultura de grande importância econômica para o Brasil, onde os colmos são fonte de matéria-prima para a produção de açúcar, álcool e outros subprodutos oriundos do processamento da indústria sucroenergética. Cultivada em diversos estados brasileiros (MAIA JUNIOR et al., 2020), o Estado do Piauí, na safra de 2018/2019, produziu 839,5 mil toneladas e produtividade agrícola estimada em 57,5 Mg ha<sup>-1</sup>, (CONAB, 2019). Em particular, esse baixo desempenho se deu em função da irregularidade das chuvas e a acentuados veranicos ocorridos durante o ciclo de cultivo.

O regime pluviométrico de uma região é o principal elemento influenciador dos cultivos agrícolas, de maneira que a ocorrência de déficit hídrico impacta negativamente a produção agrícola em todo o mundo. A cana-de-açúcar é sensivelmente influenciada pela baixa disponibilidade hídrica do solo, comprometendo o rendimento final quando esse tipo de estresse ocorre em determinadas fases ou durante todo o ciclo de desenvolvimento (SINGH, 2020). Em meio a essa realidade, o setor canavieiro do Piauí tem buscado desenvolver e aproveitar as áreas de sequeiro através de genótipos de cana-de-açúcar que sejam capazes de suportar, com maior estabilidade, o déficit hídrico comum à região. Entretanto, os estudos de campo acerca da variação no resultado ao regime de sequeiro ainda são incipientes.

Quando submetidas ao déficit hídrico os clones da cana-de-açúcar induzem alterações no potencial hídrico das folhas, em consequência, alterações fisiológicas e bioquímicas serão responsáveis por reduzir a condutância estomática e a taxa fotossintética, aumentando a concentração de substâncias osmoprotetores (prolina, trealose e glicina betaína), visando manter o turgor celular (WILLADINO et al., 2010).

Além disso, o metabolismo das proteínas fica comprometido levando a mudanças na proporção de aminoácidos e aumentos significativos na concentração de prolina. Compreende-se que a quantidade de osmoprotetores pode diferir entre clones ao longo do ciclo de cultivo. Contudo, não está claro se os picos de produção de osmoprotetores ocorrem durante o ciclo da cultura e se, essa informação, pode ser útil para embasar a escolha dos clones de cana-de-açúcar melhor adaptados ao cultivo em sequeiro.

Alguns estudos, visando investigar os mecanismos bioquímicos e fisiológicos de clones de cana-de-açúcar cultivadas em regime de sequeiro, foram realizados por

Carlin et al., 2009; Maia Júnior et al., 2020; Srivastava; Kumar et al., 2020 e Garcia et al., 2020. No entanto, por terem sido conduzidos sob condições controladas, os resultados não retratam a realidade do campo, onde os vários elementos climáticos encontram-se presentes e influenciam diretamente o comportamento dos clones.

Diante do exposto, o presente estudo objetivou avaliar clones de cana-de-açúcar cultivados em regime de sequeiro no principal polo canavieiro do Estado do Piauí, com base em parâmetros biométricos, bioquímico-fisiológicos, tecnológicos e produtivos.

## **CAPÍTULO I**

### **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **2.1- Importância da cultura da cana-de-açúcar no estado do Piauí**

O Brasil destaca-se como maior produtor e exportador mundial de cana-de-açúcar em virtude do desenvolvimento de um agronegócio forte, por meio do aumento da demanda mundial dos produtos que a cana-de-açúcar é matéria-prima. Aliado às grandes áreas cultiváveis e às condições edafoclimáticas favoráveis ao cultivo, o país é participante competitivo no mercado mundial (CONAB, 2019).

A região Nordeste é caracterizada como promissora ao desenvolvimento do setor Sucroenergético do país, apresentando expansão das áreas de cultivo da cultura. Nessa região, as características climáticas favorecem o cultivo da cana-de-açúcar, em virtude da sua exigência de luz e água (ANDRADE JUNIOR et al., 2018). Apesar do cultivo consolidado nos Estados de Alagoas, Pernambuco e Paraíba, a expansão da cana-de-açúcar em regiões não tradicionais, como o Piauí, é decorrente das características de solo, topografia, clima e logística de exportações favoráveis (TREVISAN et al., 2019).

Neste cenário, o Estado do Piauí destaca-se com áreas de expressivo potencial produtivo, alcançando 22.600 hectares na safra 2018/19 (CONAB, 2020). Apresentando clima semiárido e subúmido seco, com precipitações que variam de 800 a 1.200 mm por ano, a irregularidade de chuvas durante parte ou em todo ciclo da cultura é o principal gargalo para obtenção de altas produtividades nessa região (SILVA et al., 2019). Em virtude dessas condições hídricas como fator limitante à cultura, a identificação de clones de cana-de-açúcar que tolerem serem cultivados em ambientes de sequeiro é necessária (ANDRADE JUNIOR et al., 2017).

#### **2.2- Regime de sequeiro**

Grande parte das atividades humanas sofrem profundas influências das condições climáticas, em especial as atividades agrícolas que são vulneráveis às irregularidades pluviométricas, principalmente em áreas onde se predomina a agricultura de sequeiro (DIN et al., 2019).

Considera-se que o regime de sequeiro é um modelo de cultivo dependente exclusivamente da precipitação local para o crescimento e desenvolvimento das plantas, onde a implantação das culturas agrícolas ocorre durante o início do período chuvoso. Muitas vezes, o regime pluviométrico da região não é suficiente para atender a demanda hídrica da cultura, seja em parte ou durante o ciclo completo da cultura presente no campo (QIAO et al., 2018). Nesse sentido, cultivos de sequeiro são considerados de alto risco, visto a fragilidade desses sistemas de produção, que se refletem nas oscilações das áreas colhidas, produções, produtividade, além dos preços e renda associada a essas atividades (BEDEKE et al., 2019).

Em meio aos principais cultivos sob regime de sequeiro, a cana-de-açúcar é praticada no semiárido nordestino do Brasil por grande parte dos agricultores (LEMOS et al., 2020). Estudo realizado por Sánchez-Román et al. (2015), avaliando o desempenho produtivo da cana-de-açúcar submetida diferentes reposições hídricas (100, 75, 50, 25 e 0%), com e sem aplicação de nitrogênio na água utilizada na irrigação por gotejamento superficial em cana planta e soca, observou-se incrementos de 15,68 e 4,32% na produtividade de colmos e ATR para a cana planta e de 31,28 e 1,04% para a cana soca.

Andrade Junior et al. (2017), avaliando a produtividade de variedades de cana-de-açúcar sob diferentes formas de manejo de irrigação, observaram que as variedades de cana-de-açúcar RB962962 e RB867515 apresentaram 162,3 e 158,5 Mg ha<sup>-1</sup> de rendimento de colmos, respectivamente, em todos os sistemas de manejo, inclusive no sistema de gotejamento subsuperficial. Estes estudos demonstram que apesar de vários fatores poderem influenciar o rendimento de colmo, a reposição hídrica no solo é essencial para a evolução das taxas de produtividade da cultura da cana-de-açúcar (CORREA et al., 2019).

### **2.3 - Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar sob restrição hídrica**

O desafio atual do cultivo de cana-de-açúcar para alcançar maiores produtividades consiste em superar os efeitos deletérios da limitação hídrica. Os períodos de sua deficiência são cada vez mais extensos e, ainda mais prejudiciais ao cultivo, quando são realizados em solos com baixa capacidade de retenção hídrica (LEAKEY et al., 2019).

As fases de crescimento mais afetadas pelo déficit hídrico na cana-de-açúcar são o perfilhamento e desenvolvimento dos colmos. As áreas destinadas à produção de alimentos dependem de fatores locais, como clima e solo; embora o déficit hídrico sozinho, ou combinado com outros estresses abióticos restrinja mais as culturas agrícolas que qualquer fator ambiental isolado. Este fato faz com que a tolerância à seca das culturas destinadas à produção de alimentos, torne-se um fator primordial para a exploração de áreas agrícolas (KAUR et al., 2019).

Conforme descrito por Pincelli et al. (2012) que, avaliando respostas de variáveis morfológicas de quatro cultivares comerciais de cana-de-açúcar (SP81-3250, SP83-2847, RB855453 e RB72454) sob dois regimes hídricos, observaram que essas cultivares se comportavam de forma diferenciada à deficiência hídrica em relação as suas características morfológicas foliares. Nesse contexto, verificaram que os clones SP813250 e SP832847 quando submetidos à deficiência hídrica por período prolongado no início do desenvolvimento, apresentavam maior largura de folhas, menor dano ao número de folhas verdes e área foliar, aumento na densidade estomática nas superfícies foliares e maior produção de massa de matéria seca, as quais foram consideradas tolerantes para essa condição.

De acordo com Endres et al. (2018), a altura da planta, o comprimento da folha, o número de folhas verdes e a área foliar são indicadores morfológicos potencialmente confiáveis para selecionar clones de cana-de-açúcar tolerantes ao déficit hídrico. Nesse estudo, os dados obtidos revelaram que o rendimento de colmo está correlacionado com a altura de plantas, comprimento e diâmetro dos entrenós. Esses resultados são corroborados por aqueles encontrados por Mirajkar et al., 2019, onde a análise de trilha revelou maior efeito positivo direto da altura da planta sobre o rendimento de colmo.

Hemaprabha et al. (2013), visando identificar genótipos tolerantes à seca, estudar o padrão de segregação para a seca de híbridos elite de cana-de-açúcar e progênies de um cruzamento comercial comprovado e, analisando os atributos de produção de açúcar e parâmetros bioquímicos em condições normais e de seca observaram redução na altura das plantas (35,05%) e comprimento dos entrenós (25,13%) nas progênies.

O aumento da incidência e intensidade do déficit hídrico severo levou os programas de melhoramento da cultura da cana-de-açúcar a investirem em diversas

ações para gerar novos clones eficientes no uso da água e tolerantes ao estresse hídrico. O plantio de cultivares de cana-de-açúcar tolerantes ao déficit hídrico caracteriza-se como ferramenta preventiva para reduzir os danos causados por esse tipo de estresse. Diversos estudos têm sido conduzidos com esse propósito e focando as alterações fisiológicas imediatas que são causadas pela restrição hídrica, como o fechamento estomático parcial e redução do potencial hídrico (GONG et al., 2020).

A limitação hídrica afeta consideravelmente a eficiência fotossintética nas folhas da cana-de-açúcar que, na maioria das vezes, são acompanhados de baixa área e alongamento de folhas e caules, principalmente pela redução gradual da expansão celular, que é imposta pelo déficit hídrico (ANJUM et al., 2017).

As altas temperaturas são geralmente favoráveis à atividade fotossintética, entretanto quando combinadas com déficit hídrico pode aumentar a velocidade de transpiração que, muitas vezes se torna maior que a captação de água pelas raízes, pode promover respostas diferentes entre as cultivares (IQBAL et al., 2020).

Fisiologicamente, quando as plantas são submetidas ao déficit hídrico, a taxa fotossintética é uma das variáveis que apresenta maior sensibilidade à limitação de água no solo (SOUSA et al., 2020). Porém, as plantas podem continuar realizando fotossíntese por tempo superior àquele destinado ao crescimento em expansão, pois os estômatos respondem mais lentamente no início do estresse hídrico que o turgor celular (TARDIEU et al., 2012). Dessa forma, ocorre redução na condutância estomática à assimilação de CO<sub>2</sub>, consecutivamente à atividade fotoquímica que irá causar alterações nas taxas de crescimento, refletindo consideravelmente na produção.

Com concentrações intercelulares de CO<sub>2</sub> mais baixas, a fotossíntese é fortemente limitada. Nesse caso, a planta precisa equilibrar a necessidade de conservar água e assimilar CO<sub>2</sub> atmosférico, fazendo que a área foliar desempenhe papel importante na difusão do dióxido de carbono e no vapor de água entre os estômatos. Transpiração e fotossíntese, com a consequente acumulação de massa seca estão relacionadas às trocas gasosas entre os estômatos e a atmosfera (HARRISON et al., 2020).

A tolerância ao déficit hídrico em algumas variedades de cana-de-açúcar está, em geral, associada à manutenção da integridade da membrana celular, sendo essas

protegidas contra lesões causadas por condições de déficit hídrico (SÁNCHEZ-ELORDI et al., 2020).

#### **2.4- Deficiência hídrica do solo e o metabolismo do carbono**

Os cultivos agrícolas estão sujeitos à períodos de deficiência hídrica no solo, de maneira que a redução na turgescência celular é suficiente para o fechamento dos estômatos, limitando a absorção de dióxido de carbono e diminuindo sensivelmente a atividade de assimilação de carbono, paralisando o crescimento das plantas e reduzindo a biossíntese proteica (LIMA-MELO et al., 2019; OSHUNSANYA et al., 2019).

A taxa de assimilação líquida de carbono é determinada pelas características bioquímicas, fisiológicas e morfológicas da maquinaria fotossintética, variando com as condições do ambiente tais como: irradiância; temperatura, concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), suprimento de água e nutrientes (MOHOTTI; LAWLOR, 2012).

Por meio do controle estomático, as plantas diminuem a perda de água e reduz a assimilação fotossintética, sendo necessário o uso das reservas acumuladas (SIMÕES et al., 2019). O acúmulo de amido nas folhas ocorre quando há paralisação na exportação de triose-fosfato do cloroplasto e, normalmente, está associado à redução da força do dreno e dos teores de sacarose no tecido (PAUL et al., 2003; AINSWORTH; BUSH et al., 2011). Neste sentido, o amido de reserva é hidrolisado pela atividade das amilases, havendo maior acúmulo de carboidratos solúveis, aminoácidos e ácidos orgânicos que serão utilizados na respiração, crescimento e síntese de novos tecidos (VOLENEC et al., 2020). O amido transitório é sintetizado nos cloroplastos das plantas superiores como resultado do excesso de carbono recém-assimilado (SMITH; ZEEMAN et al., 2020).

A assimilação da planta, em geral, é suficiente para suprir, não somente a demanda imediata do crescimento (a partir da síntese e mobilização de sacarose), mas para acumular compostos na folha (síntese de amido transitório) (SMITH; ZEEMAN et al., 2020). Durante a noite subsequente ao período de assimilação, o amido transitório é degradado, gerando substratos que serão utilizados na síntese de sacarose. Esse açúcar fornece esqueletos de carbono e energia tanto para as células foliares como para os tecidos não fotossintetizantes (MACNEILL et al., 2017). Dessa

forma, a degradação do amido durante o período noturno auxilia na provisão de carbono necessário ao crescimento da planta. Esse argumento foi corroborado por Sales et al. (2015) que avaliando plantas de cana-de-açúcar sob condições de estresse radicular, demonstrou que o teor foliar de carboidratos não estruturais, sacarose e amido nas plantas é aumentando sob frio de raiz.

## **2.5- Mecanismos de tolerância ao déficit hídrico**

As plantas desenvolveram várias estratégias de tolerância à seca como: mudanças no ciclo de vida, modulação do crescimento e desenvolvimento (para combinar com o suprimento limitado de água), regulação de funções da planta, ajustes na alocação de recursos para o crescimento durante o estresse ou a evolução da percepção do sinal de estresse, e a longo prazo, a tolerância ao estresse (HIRAYAMA et al., 2010; HU et al., 2014; YOU et al., 2015).

A base de conhecimento em expansão ajudou a identificar os principais genes associados à tolerância à seca e à manutenção do crescimento. Toda essa expansão possibilita o desenvolvimento de condições de déficit hídrico em várias culturas, incluindo a cana-de-açúcar (AUGUSTINE et al., 2015; RAMIRO et al., 2016). A cana é uma cultura tropical com metabolismo fotossintético C4 em que, sob estresse hídrico moderado, ocorre diminuição na condutância estomática ( $g_s$ ), na taxa de transpiração ( $E$ ), na concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ) e na taxa fotossintética. Isso sucede principalmente pelas limitações estomáticas, que juntamente com a inibição do crescimento de colmo e folhas, pode ser considerada adaptação inicial mais comum quando os clones de cana-de-açúcar são submetidas à desidratação leve à moderada (BASNAYAKE et al., 2015).

A suscetibilidade da cana-de-açúcar à limitação de água no solo é maior nas fases de perfilhamento e alongamento do caule, visto que o crescimento do colmo e folhas são mais afetados. Esse tipo de estresse, quando moderado na fase de maturação, tem efeitos positivos sobre o rendimento de açúcar (sacarose) devido a fotossíntese ser menos sensível ao estresse que o crescimento das plantas, canalizando o  $CO_2$  assimilado para a produção de sacarose e acumulação de sólidos solúveis no colmo (MACHADO et al., 2009; LAKSHMANAN; ROBINSON et al., 2014).



Além disso, sob deficiência hídrica, a divisão e o alongamento celular são interrompidos (MACHADO et al., 2009; INMAN-BAMBER, 2005). O desenvolvimento radicular também é influenciado pelo déficit hídrico, mas relativamente menor que a biomassa acima do solo (INMAN-BAMBER et al., 2008). O declínio induzido pelo estresse hídrico na taxa fotossintética é causado principalmente por reduções na atividade da fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase) e, posteriormente, na atividade da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase (Rubisco) (LAKSHMANAN; ROBINSON, 2014). Vale ressaltar que a taxa de fotossíntese também é impactada pelo acúmulo de açúcar nas folhas, pois, sob condições não estressantes, o baixo teor de açúcar nas folhas é propício à fotossíntese, enquanto o alto teor de açúcar modera a fixação de carbono (FERREIRA et al., 2017).

A produção e o transporte de fotoassimilados nas plantas são regulados pela atividade fotossintética e pela força do dreno. A fotossíntese está associada à maior demanda por carbono pelos colmos, por se tratar de um dreno de alta prioridade na alocação dos fotoassimilados que, mesmo em períodos curtos de restrição hídrica, pode comprometer o acúmulo de sacarose no colmo (HENNION et al., 2019).

Assim, a redução no teor foliar de amido foliar em plantas sob déficit hídrico sugere que as plantas utilizam-se das reservas foliares disponíveis para suprir a demanda do dreno e/ou arcar com os custos metabólicos da manutenção da homeostase sob condição estressante. Níveis aumentados de açúcares como a trealose podem estar envolvidos nas respostas ao déficit hídrico que reduzem os danos à membrana celular. Assim, a capacidade de acumular trealose foi observada em raízes de cana-de-açúcar sob limitação hídrica, ocasionando aumento na hidrólise de amido e propiciando níveis mais elevados de açúcares solúveis (FÀBREGAS et al., 2019).

Na avaliação de Santos et al. (2019), a tolerância à seca de variedades de cana-de-açúcar em diferentes fenofases, possibilita identificar características fisiológicas e bioquímicas associadas à menor perda de produtividade em condições de déficit hídrico. Observaram ainda que as variedades RB867515 e RB92579 não sofreram alterações significativas no potencial osmótico ao meio-dia, durante o estresse hídrico na fase de crescimento intenso, apesar do baixo potencial hídrico foliar e da pouca variação nos teores de osmorreguladores. Por esses considerandos, essas duas variedades apresentaram maiores potenciais de adaptação à ambientes

com pouco fornecimento de água, apresentando também maior rendimento produtivo quando submetidas às condições de seca.

Ainda na pesquisa de Santos et al. (2019), observou-se que as variedades mais afetadas pela limitação hídrica das diferentes fenofases foram RB855536 e RB855113, ocorrendo maiores reduções no potencial hídrico e osmótico, e maior acúmulo de osmorregulador em resposta à seca, mas não o suficiente para evitar a desidratação, o que provavelmente contribuiu para o menor desempenho produtivo.

Para sobreviver e crescer sob estresse, as plantas desenvolvem diferentes mecanismos adaptativos: escape, retardo e tolerância à desidratação.

### **2.5.1- Escape**

Em geral, plantas que se desenvolvem em climas com sazonalidade acentuada são capazes de adaptar-se às condições ambientais flutuantes, aumentando sua eficiência para essas condições limitantes (BARON; BÉLANGER et al., 2020).

Uma das estratégias consiste em escapar do estresse hídrico, por um curto ciclo de colheita, permitindo que as plantas concluam seu ciclo antes que o estresse hídrico severo se instale (BYKOVA et al., 2019).

### **2.5.2- Retardo**

O retardo à desidratação envolve mecanismos voltados para manutenção do nível de hidratação celular pela baixa condutância estomática durante a condição de estresse (BLUM, 2005; KOOYERS, 2015).

Os mecanismos de prevenção são características importantes em áreas com déficit hídrico, pois aumentam as chances de capturar ao máximo a umidade do solo, limitando a perda de água e retendo a hidratação celular, permitindo, portanto, a recuperação da colheita quando o estresse é aliviado.

De acordo com o estudo desenvolvido por Inman-Bamber et al. (2012), avaliando variedades de cana-de-açúcar para ambientes com limitação hídrica, observaram o aumento da profundidade do enraizamento e da eficiência intrínseca do uso da água e, em menor extensão, ocorreu redução da condutância, levando ao aumento da eficiência de transpiração. Tais efeitos são sugeridos como as melhores características a serem consideradas para a seleção de clones de cana-de-açúcar em ambientes com limitação de água nos trópicos e subtropicais. No entanto, sob estresse hídrico, esses mecanismos reduzem o acúmulo de biomassa por meio de grande

redução na área foliar e fixação de carbono (BLUM 2005; TARDIEU, 2012; COMINELLI et al., 2013).

### **2.5.3-Tolerância**

A tolerância à seca é um mecanismo que permite às plantas manter o metabolismo, tolerando a redução do potencial hídrico dos tecidos sob déficit hídrico, principalmente pelo acúmulo de solutos compatíveis ou osmólitos, proteínas osmoprotetoras e pela capacidade antioxidante (SAXENA et al., 2019).

Mecanismos de tolerância são características favoráveis, em condições de déficit hídrico leve e moderado, pois permitem a manutenção do crescimento durante o estresse. As características de tolerância estão diretamente ligadas à alta condutância estomática, sustentando a taxa de fotossíntese e também a tolerância ao estresse térmico ao diminuir a temperatura das folhas (BLUM, 2005; TARDIEU, 2012; COMINELLI et al., 2013).

Oliveira et al. (2010) avaliando o crescimento e a produtividade de onze (11) variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação total, verificaram maiores taxas de perfilhamento na variedade RB92579. Zhao et al. (2013), também observaram que essa variedade foi mais tolerante ao ambiente de sequeiro, apresentando maiores taxas de perfilhamento sob estresse hídrico. Esses autores afirmaram ainda que o perfilhamento e o comprimento do colmo podem ser indicadores úteis para detectar precocemente clones de cana-de-açúcar tolerantes ao estresse hídrico.

Como discutido acima, os mecanismos de tolerância à desidratação ajudam a alcançar melhor crescimento e rendimento de colheita, embora o(s) mecanismo(s) exato(s) de tolerância ao estresse hídrico não sejam totalmente compreendidos na cana-de-açúcar (SILVA et al., 2012; BASNAYAKE et al., 2015).

Algumas dessas características estão envolvidas no melhor desempenho das culturas sob estresse leve a moderado, entre as quais podemos citar: maior número perfilhos, altura e peso de colmo, o diâmetro do colmo (dependente do genótipo que do ambiente), teor de clorofila foliar (índice SPAD), temperatura das folhas e dossel, taxa de fotossíntese, condutância estomática e taxa de transpiração (SILVA et al., 2012; BASNAYAKE et al., 2015). Sendo que essas características ainda podem ser utilizados como critério de seleção indireta para genótipos de cana-de-açúcar tolerantes ao estresse hídrico, entre outros (SILVA et al., 2012; BASNAYAKE et al., 2015).

#### **2.5.4- Eficiência do uso da água**

A eficiência no uso da água ( $\text{kg m}^{-3}$ ) é definida como a relação entre a produtividade da cultura ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e o volume total de água consumido nos processos fisiológicos de produção ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ). Observa-se que o consumo anual de água pela cana-de-açúcar pode variar de 1.500 a 2.500 mm (15.000 a 25.000  $\text{m}^3/\text{ha}$ ) (LEAL et al., 2017).

A disponibilidade hídrica adequada pode reduzir, significativamente, as perdas e proporcionar ainda condições favoráveis ao desenvolvimento vegetativo da planta. Por ser uma planta C4, a cultura da cana-de-açúcar possui alta eficiência fotossintética com elevada saturação de luz (LEAKEY et al., 2019). Desde modo, quando a demanda hídrica está adequada, os incrementos na produtividade podem ser atribuídos ao fornecimento de água durante todo o período de crescimento, proporcionando maior acesso aos nutrientes, via sistema radicular da cultura.

Como resultado, ocorre a remobilização de energia e de carboidratos das raízes, para o aumento do perfilhamento e o alongamento do colmo (INMAN-BAMBER et al., 2005), que é estimulado pela produção de hormônios vegetais, responsáveis pelo crescimento vegetativo da parte aérea das plantas (TAKEI et al., 2002).

Plantas que possuem melhor controle da função estomática são mais tolerantes à seca, já que os estômatos podem ser regulados com base no nível de déficit hídrico, fechando apenas parcialmente os estômatos. Nesse sentido, levando a ocorrer alguma fixação de carbono durante as condições de seca e ao aumento na eficiência do uso da água (SANTOS et al., 2019).

Estudos anteriores mostram que a eficiência das trocas gasosas, nas plantas que possuem maior capacidade fotossintética, resulta em maior eficiência do uso da água e em maior eficiência intrínseca, correlacionada positivamente com a manutenção da produtividade, durante os períodos de seca, em diversos cultivos agrícolas, incluindo a cana-de-açúcar (LEAKEY et al., 2019).

#### **2.6 - Acúmulo de osmoprotetores e a limitação hídrica**

A capacidade das plantas se recuperarem do estresse hídrico, após a reidratação, está fortemente ligada aos mecanismos de tolerância acionados durante o estresse (ZHANG et al., 2019). A produção de osmoprotetores, como prolina, glicina

betaína, entre outros, em plantas estressadas, ajuda a mitigar os danos fotoquímicos do PSII, permitindo melhor recuperação pós-seca.

Em conformidade com a pesquisa realizado por Santos et al. (2015), que avaliando alterações fisiológicas associadas às enzimas antioxidantes em resposta à tolerância da cana-de-açúcar ao déficit de água e reidratação, concluíram que o déficit hídrico aumentou os níveis de prolina e das enzimas superóxido dismutase e ascorbato peroxidase em todas as cultivares. Nesse estudo, observou-se ainda, o aumento de carboidratos sob estresse, exceto na cultivar SP81-3250, que apresentou teor reduzido. Devido aos menores danos causados pela seca na fisiologia e na bioquímica das cultivares SP83-2847 e IAC91-5155, elas apresentam maior potencial de tolerância à ambientes com limitação hídrica.

Em geral, nas regiões tropicais, o estresse hídrico é associado ao aumento da radiação solar e temperatura, o que faz aumentar ainda mais a energia que chega aos fotossistema, causando fotoinibição e fotossíntese reduzida (ZHANG et al., 2019; GUIDI et al., 2019).

Quando ocorre a fotoinibição, a energia luminosa excede a quantidade de energia utilizada na fotossíntese, causando declínio na eficiência quântica efetiva do PSII (VENDAS et al., 2013; TRUJILLO et al., 2013; GUIDI et al., 2019).

O acúmulo de osmorreguladores, dependendo de suas concentrações, é indicado como um mecanismo auxiliar que contribui, para manter a turgidez celular, mesmo com baixo potencial hídrico (ZHANG et al., 2019). Embora alguns estudos já tenham investigado o acúmulo de osmorreguladores, na tolerância à seca da cana-de-açúcar, pouco se sabe sobre sua ação em conjunto com regulação da atividade do PSII em resposta ao estresse e pós-estresse na cana-de-açúcar (SANTOS et al., 2015; ABBAS et al., 2014; VANTINI et al., 2016).

A prolina está ligada a mecanismos que previnem a perda de água nas plantas, por meio de ajuste osmótico, atuando como osmorregulador celular. Esses benefícios podem ser decorrentes da compartimentação subcelular entre citosol, cloroplastos e mitocôndrias, permitindo que funções específicas sejam executadas nesses diferentes compartimentos celulares (KAUR et al., 2015).

Conforme Vantini et al. (2016), que avaliou os acúmulos em níveis de prolina nas raízes de duas cultivares de cana-de-açúcar submetidas à seca, uma tolerante (RB867515) e outra sensível (SP86-155), o maior acúmulo de prolina na cultivar

tolerante comprovou seu caráter de tolerância à seca. Esse osmoprotetor ajudou as plantas a manterem sua turgidez após cinco dias de déficit hídrico (estresse moderado) e a lidar com o déficit hídrico por 10 dias (estresse severo) quando comparadas com a planta sensível. O resultado deste trabalho indica que o metabolismo da prolina acelerou os processos de sinalização celular que promoveram a turgidez celular, favorecendo a sobrevivência da cultivar tolerante por um maior período de déficit hídrico.

Em trabalho conduzido por Abbas et al. (2014), avaliando 13 genótipos de cana-de-açúcar expostos a diferentes intensidades de limitação hídrica, seguido por um período de reidratação, verificou-se que as concentrações de prolina, glicina betaína, peroxidação lipídica e conteúdos fenólicos na folha, frente a diferentes doses de polietilenoglicol, aumentaram quando a concentração de PEG aumentou. Esses resultados reafirmam os estudos realizados com cana-de-açúcar, onde altas concentrações de prolina atuaram como antioxidantes, diminuindo o estresse oxidativo e contribuindo para o equilíbrio fotoquímico dos cloroplastos (HEMAPRABHA et al., 2013; SANTOS et al., 2015).

O acúmulo de açúcar solúvel também pode estar associado a mecanismos que evitam a perda de água nas plantas como ajuste osmótico. Estudos mostram que o total de carboidratos solúveis permaneceu constante nas folhas e aumentou nas raízes de plantas de cana-de-açúcar submetidas à seca (HAYAT et al., 2010; SALES et al., 2015).

Segundo esses autores, os teores de carboidratos solúveis permanecem constantes, provavelmente pela degradação das reservas de amido. Os níveis aumentados de carboidratos solúveis totais também foram observados na cana sob estresse hídrico e salino (PATADE et al., 2011).

Solutos como carboidratos solúveis, prolina, glicina betaína, entre outros, podem ser acumulados em altos níveis, em muitos casos, sob baixos potenciais hídricos, no entanto, sem causar nenhum transtorno à função proteica, visto que são hidrofílicos e podem proteger a célula contra a desidratação (FORLANI et al., 2019).

A osmorregulação, por si só, não é responsável pelo crescimento, pois a turgescência gerada não constitui o único fator de controle, além da elasticidade da parede celular e, por conseguinte, do coeficiente de sua elasticidade (ROJAS et al., 2017). O ajustamento osmótico visa promover o turgor necessário ao crescimento,

mas não ocorrendo o ajustamento da elasticidade da parede celular, isto é, aumentando a sua capacidade de extensão, não haverá crescimento (SÁNCHEZ-BLANCO et al., 2019).

### 3 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, S.R.; AHMAD, S.D.; SABIR, S.M.; SHAH, A. H. Detection of drought tolerant sugarcane genotypes (*Saccharum officinarum*) using lipid peroxidation, antioxidant activity, glycinebetaine and proline contents. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.14, n.1, p.233-6243, 2014.

AINSWORTH, E.A.; BUSH, D.R. Carbohydrate export from the leaf: a highly regulated process and target to enhance photosynthesis and productivity. **Plant Physiology**, v.155, p.64-69, 2011.

ANDRADE JUNIOR, A.S.; BASTOS, E.; RIBEIRO, V.; LOPES, A.D.S.; SILVA, M.V. P.; SILVA, J. Produtividade de colmos e eficiência do uso de água em cultivares de cana-de-açúcar em gotejamento subsuperficial. **Embrapa Meio-Norte - Comunicado Técnico** (INFOTECA-E), 2018.

ANDRADE JUNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; ATHAYDE SOBRINHO, C.; SILVA, P.H.S. Stalk yield of sugarcane cultivars under different water regimes by subsurface drip irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.3, p.169-174, 2017.

ANJUM, S.A.; ASHRAF, U.; TANVEER, M.; KHAN, I.; HUSSAIN, S.; ZOHAIB, A. Drought tolerance in three maize cultivars is related to differential osmolyte accumulation, antioxidant defense system, and oxidative damage. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.69-82, 2017.

AUGUSTINE, S.M.; CHERIAN, A.V.; SYAMALADEVI, D.P.; SUBRAMONIAN, N. Erianthus arundinaceus HSP70 (EaHSP70) acts as a key regulator in the formation of anisotropic interdigitation in sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) in response to drought stress. **Plant and Cell Physiology**, v.56, n.12, p. 23-34, 2015.

BARON, V.S.; BÉLANGER, G. Climate, Climate-Change and Forage Adaptation. Forages: **The Science of Grassland Agriculture**, v.2, p.151-186, 2020.

BASNAYAKE, J.; JACKSON, P.A.; INMAN.BAMBER, N.G.; LAKSHMANAN, P. Sugarcane for water-limited environments. Variation in stomatal conductance and its genetic correlation with crop productivity. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n.13, p.3945-3958, 2015.

BEDEKE, S.; VANHOVE, W.; GEZAHEGN, M.; NATARAJAN, K.; VAN DAMME, P. Adoption of climate change adaptation strategies by maize-dependent smallholders in Ethiopia. **NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 88, p. 96-104, 2019.

BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential are they compatible, dissonant, or mutually exclusive. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.56, n.11, p.1159-1168, 2005.

BYKOVA, O.; CHUINE, I.; MORIN, X. Highlighting the importance of water availability in reproductive processes to understand climate change impacts on plant biodiversity. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v.37, p. 20-25, 2019.

CARLIN, S.D.; SANTOS, D.M.M. Physiological indicators of the interaction between water deficit and soil acidity in sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1106-1113, 2009.

COMINELLI, E.; CONTI, L.; TONELLI, C.; GALBIATI, M. Challenges and perspectives to improve crop drought and salinity tolerance. **New Biotechnology**, v.30, n.4, p.355-361, 2013.

CONAB | ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR | v. 7 - Safra 2020/21, n.1 - **Primeiro levantamento**, maio de 2020.

CONAB | ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR | v. 6 - Safra 2019/20, n.1 - **Primeiro levantamento**, maio de 2019.

CORREA, D.F.; BEYER, H.L.; FARGIONE, J.E.; HILL, J.D.; POSSINGHAM, H.P.; THOMAS-HALL, S.R.; SCHENK, P.M. Para a implementação de sistemas sustentáveis de produção de biocombustíveis. **Revisões de Energias Renováveis e Sustentáveis**, v.107, p. 250-263, 2019.

DIN, M.S.U.; AHMAD, I.; HUSSAIN, N.; AHMAD, A.; WAJID, A.; KHALIQ, T.; AMANET, K. Agronomic Cropping Systems in Relation to Climatic Variability. **Agronomic Crops**, p.67-82, 2019.

ENDRES, L.; SILVA, J.V.; BLACKSMITH, V.M.; BARBOSA, G.V.S. Photosynthesis and to water relations in Brazilian sugarcane. **The Open Agriculture Journal**, v. 4, p.31-37, 2010.

FÀBREGAS, N.; FERNIE, A.R. A resposta metabólica à seca. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 4, pág. 1077-1085, 2019.



FERREIRA, T.H.; TSUNADA, M.S.; BASSI, D.; ARAÚJO, P.; MATTIELLO, L.; GUIDELLI, G.; MENOSSI, M. Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.1063-1077, 2017.

FORLANI G.; TROVATO M., FUNCK D., SIGNORELLI S. Regulation of Proline Accumulation and Its Molecular and Physiological Functions in Stress Defence. In: Hossain M., Kumar V., Burritt D., Fujita M., Mäkelä P. (eds) **Osmoprotectant-Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants**, p.73-97, 2019.

GARCIA, F.H.; MENDONÇA, A.M.C.; RODRIGUES, M.; MATIAS, F.I.; SILVA FILHO, M.P.; SANTOS, H.R.; BARBOSA, J.P. Water deficit tolerance in sugarcane is dependent on the accumulation of sugar in the leaf. **Annals of Applied Biology**, v.176, n.1, p.65-74, 2020.

GONG, X.; LI, J.; MA, H.; CHEN, G.; DANG, K.; YANG, P.; FENG, B. Nitrogen deficiency induced a decrease in grain yield related to photosynthetic characteristics, carbon–nitrogen balance and nitrogen use efficiency in proso millet (*Panicum miliaceum* L.). **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.66, n.3, p.398-413, 2020.

GUIDI, L.; LANDI, M.; LO PICCOLO, E. Fluorescência de clorofila, fotoinibição e estresse abiótico: faz alguma diferença o fato de ser uma espécie C3 ou C4? **Fronteiras em Ciência das Plantas**, v.10, p.174, 2019.

HARRISON, E. L., ARCE CUBAS, L., GRAY, J. E., HEPWORTH, C. The influence of stomatal morphology and distribution on photosynthetic gas exchange. **The Plant Journal**, v. 101, n. 4, p. 768-779, 2020.

HAYAT, R.; ALI, S.; AMARA, U. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: **A Review**, v.60, n. 579, 2010.

HEMAPRABHA, G.; SWAPNA, S.; LAVANYA, D.L.; SAJITHA, B.; VENKATARAMANA, S. Evaluation of drought tolerance potential of elite genotypes and progenies of sugarcane (*Saccharum* sp. hybrids). **Sugar Tech**, v.15, n.1, p. 9-16. 2013.

HENNION, N., DURAND, M., VRIET, C., DOIDY, J., MAUROUSSET, L., LEMOINE, R., POURTAU, N. Sugars en route to the roots. Transport, metabolism and storage within plant roots and towards microorganisms of the rhizosphere. **Physiologia Plantarum**, v. 165, n. 1, p. 44-57, 2019.

HIRAYAMA, T.; SHINOZAKI, K. Research on plant abiotic stress responses in the post-genome era: Past, present and future. **The Plant Journal**, v. 61, n. 6, p. 1041-1052, 2010.

HU, H.; XIONG, L. Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. **Annual Review of Plant Biology**, v.65, p.715-741, 2014.

INMAN-BAMBER, N. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p.107-122, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; LAKSHMANAN, P.; PARK, S. Sugarcane for water-limited environments: theoretical assessment of suitable traits. **Field Crops Research**, v.134, p.95-104, 2012.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v.92, p.185-202, 2008.

IQBAL, A.;TIWARI, A.K.; RAO, G.P. Detection of mixed infection of phytoplasmas and yellow leaf virus in commercial sugarcane cultivars and their impact on yield and quality parameters. **Phytopathogenic Mollicutes**, v.5, n.1, p.95-106, 2015.

KAUR, C.; PAREEK, A.; SINGLA-PAREEK, S.L. Perception of Stress Environment in Plants. **Sensory Biology of Plants**, v.2, p.163-186, 2019.

KAUR, R.; UPPAL, S.K. Structural characterization and antioxidant activity of lignin from sugarcane bagasse. **Colloid and Polymer Science**, v.293, n.9, p.2585-2592, 2015.

KOOYERS, N.J.A. Evolução da fuga e evasão de secas em populações herbáceas naturais. **Plant Science**. v.234, p.155-162, 2015.

LAKSHMANAN, P.; ROBINSON, N. Stress physiology: Abiotic stresses. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**, p. 411-434, 2014.

LEAKEY, A.D.F.; FERGUSON, J.N.; PIGNON, C.P.; WU, A.; JIN, Z.; HAMMER, G.L.; LOBEL, L.D.B. Water use efficiency as a constraint and target for improving the resilience and productivity of C3 and C4 crops. **Annual Review of Plant Biology**, v.70, p.781-808, 2019.

LEAL, M.R.L.; GALDOS, M.V.; SCARPARE, F.V.; SEABRA, J.E.A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C.O.F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review. **Biomass Bioenerg**, v.53, p.11-19, 2017.

LEMOS, J.D.J.S.; SANTIAGO, D.F. Instabilidade da agricultura familiar no Semiárido. **Revista de Política Agrícola**, v. 1, n. 1, p. 94, 2020.

LIMA-MELO, Y.; GOLLAN, P.J.; TIKKANEN, M.; SILVEIRA, J.A.; ARO, E.M. Consequences of photosystem-I damage and repair on photosynthesis and carbon use in *Arabidopsis thaliana*. **The Plant Journal**, v.97, p.1061-1072, 2019.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S. P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G. A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MACNEILL, G.J.; MEHRPOUYAN, S.; MINOW, M.A.; PATTERSON, J.A.; TETLOW, I.J.; EMES, M.J.; RAINES, C. Starch as a source, starch as a sink: the bifunctional role of starch in carbon allocation. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 16, p. 4433-4453, 2017.

MAIA JÚNIOR, S. O.; ANDRADE, J.R.; SANTOS, C.M., SILVA, A.L.J.; ENDRES, L.; SILVA, J.V.; SILVA, L.K.S. Osmoregulators' accumulation minimizes the effects of drought stress in sugarcane and contributes to the recovery of photochemical efficiency in photosystem II after rewatering. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 42, p. 1-11, 2020.

MOHOTTI, A.J.; LAWLOR, D.W. Diurnal variation of photosynthesis and photoinhibition in tea: effects of irradiance and nitrogen supply during growth in the field. **Journal of Experimental Botany**, v.53, p. 313-322, 2012.

OLIVEIRA, E. C. A. D., FREIRE, F. J., OLIVEIRA, R. I. D., FREIRE, M. B. G. D. S., SIMÕES NETO, D. E., SILVA, S. A. M. D. Nutrient extraction and export by fully irrigated sugarcane varieties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1343-1352, 2010.

OSHUNSANYA, S.O.; NWOSU, N.J.; LI, Y. Abiotic Stress in Agricultural Crops Under Climatic Conditions. **Sustainable Agriculture, Forest and Environmental Management**, p.71-100, 2019.

PATADE, V.Y.; LOKHANDE, V.H.; SUPRASANNA, P. Exogenous application of proline alleviates salt induced oxidative stress more efficiently than glycinebetaine in sugarcane cultured cells. **Sugar Tech**, v.16, p.22-29. 2011.

PAUL, M.J.; PRIMAVESI, L.F.; JHURREEA, D.; ZHANG, Y. Trehalose metabolism and signaling. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.417-441, 2003.

PINCELLI, R. P., SILVA, M. A. Alterações morfológicas foliares em cultivares de cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 4, 2012.

QIAO, J.; YU, D.; WANG, Q.; LIU, Y. Diverse effects of crop distribution and climate change on crop production in the agro-pastoral transitional zone of China. **Frontiers of Earth Science**, v. 12, n. 2, p. 408-419, 2018.

RAMIRO, D.A.; MELOTTO-PASSARIN, D.M.; BARBOSA, M.D.A.; SANTOS, F.D.; GOMEZ, S.G.P.; MASSOLA JUNIOR, N.S. Expression of Arabidopsis Bax Inhibitor-1 in transgenic sugarcane confers drought tolerance. **Plant Biotechnology Journal**, v.14, n.9, p.1826-1837, 2016.

ROJAS, E.R.; HUANG, K.C.; THERIOT, J.A. Homeostatic cell growth is accomplished mechanically through membrane tension inhibition of cell-wall synthesis. **Cell Systems**, v.5, n.6, p.578-590, 2017.

SALES, C.R.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, R.S.; FONTENELE, A.V.; MACHADO, E.C.; SILVEIRA, J.A.G.; RIBEIRO, R.V. Photosynthetic and antioxidant responses to drought during sugarcane ripening. **Photosynthetica**, v.53, n.4, p.547-554, 2015.

SÁNCHEZ-BLANCO, M.J.; ORTUÑO, M.F.; BAÑON, S.; ÁLVAREZ, S. Deficit irrigation as a strategy to control growth in ornamental plants and enhance their ability to adapt to drought conditions. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v.94, n.2, p.137-150, 2019.

SÁNCHEZ-ELORDI, E.; STERLING, R. M.; SANTIAGO, R.; ARMAS, R.; VICENTE, C.; LEGAZ, M.E. Increase in cytotoxic lignans production after smut infection in sugar cane plants. **Journal of Plant Physiology**, v.244, p.153087, 2020.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; SILVA, N.F.; CUNHA, F.N.; TEIXEIRA, M.B.; SOARES, F.A.L.; RIBEIRO, P. H.P. Produtividade da cana-de-açúcar submetida a diferentes reposições hídricas e nitrogênio em dois ciclos. **Irriga**, v. 1, n. 1, p.198-210, 2015.

SANTOS, C.M.; ALMEIDA, M.; SILVA, G.P.; LIMA, F.P.; ALMEIDA, P. BORTOLHEIRO, M.C.; BRUNELLI, L.A.; HOLANDA, R. O. Physiological changes associated with antioxidant enzymes in response to sugarcane tolerance to water deficit and rehydration. **Sugar Tech**, v.17, p.291-304, 2015.

SANTOS, L.C.; COELHO, R.D.; BARBOSA, F.S.; LEAL, D.P.; JÚNIOR, E.F.F.; BARROS, T.H.; RIBEIRO, N.L. Influence of deficit irrigation on accumulation and

partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties. **Agricultural Water Management**, v.221, p.322-333, 2019.

SAXENA, R.; KUMAR, M.; TOMAR, R.S. Plant responses and resilience towards drought and salinity stress. **Plant Archives**, v.19, n.2, p.50-58, 2019.

SILVA, A.L.C.; COSTA, W.A.J.M. Varietal variation in stomatal conductance, transpiration and photosynthesis of commercial sugarcane varieties under two contrasting water regimes. **Tropical Agricultural Research and Extension**, v.12, p.97-102, 2012.

SILVA, E.M.P.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q. Produtividade de colmos e eficiência do uso da água em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. **Irriga**, v.24, p.162-176, 2019.

SIMÕES, P.; LAAMON, V.J.; LEITE, M.L.M.V.; IZIDRO,S.; PINTO,J.L.; NASCIMENTO.A.J.,G.; TEIXEIRA,I.V. Assimilação de carbono em plantas forrageiras. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v.12, n. 1, 2019.

SINGH, H. Climate change, its impact and mitigation strategies for sugarcane production: **A review. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v.9, n.3, p. 1288-1294, 2020.

SMITH, A.M.; ZEEMAN, S.C. Starch: A Flexible, Adaptable Carbon Store Coupled to Plant Growth. **Annual Review of Plant Biology**, v. 71, p. 217-245, 2020.

SRIVASTAVA, S.; KUMAR, P. Abiotic Stress Responses and Tolerance Mechanisms for Sustaining Crop Productivity in Sugarcane. **Agronomic Crops**. p. 29-47, 2020.

TAKEI, K.; TAKAHASHI, T.; SUGIYAMA, T.; YAMAYA, T.; SAKAKIBARA, H. Multiple routes communicating nitrogen availability from roots to shoots: a signal transduction pathway mediated by cytokinin. **Journal of Experimental Botany**, v.53, n.370, p.971-977, 2002.

TARDIEU, F. Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right drought scenario. **Journal of Experimental Botany**, v.63, n.1, p.25-31, 2012.

TREVISAN, D.P.; MOSCHINI, L.E. Evolução do mercado de cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.16, n.2, p.139-148, 2019.

TRUJILLO, L.E.; SOTOLONGO, M.; MENENDEZ, C.; OCHOGAVIA, M.E.; COLL, Y.; HERNANDEZ, I.; HERNANDEZ, L. SodERF3, a novel sugarcane ethylene responsive

factor (ERF), enhances salt and drought tolerance when overexpressed in tobacco plants. **Plant and Cell Physiology**, v.49, n.4, p.512-525, 2008.

VANTINI, J.S.; CARLIN, S.D.; GIMENEZ, D.F.J.; PERECIN, D.; FERRO, J.A.; FERRO, M.I.T. Proline accumulation in sugarcane roots subjected to drought conditions. **Científica**, v. 44, n.4, p.592-598, 2016.

VENDAS, C.R.G.; RIBEIRO, R.V.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, R.S.; DOVIS, V.L.; LAGÔA, A.M.M.A. Trocas gasosas e balanço de carboidratos em plantas de cana-de-açúcar sob condições estressantes da raiz. **Bragantia**, v.71, n.3, p. 319-327, 2013.

VOLENEC, J.J.; NELSON, C.J. Carbon Metabolism in Forage Plants. **Forages: The Science of Grassland Agriculture**, v.2, p.65-84, 2020.

WILLADINO, L.; CAMARA, T.R. Tolerância das plantas à salinidade: aspectos fisiológicos e bioquímicos. **Enciclopédia Biosfera**, v.6, n.11, p.1-23, 2010.

YANG, Y.; FU, Z.; SU, Y.; ZHANG, X.; LI, G.; GUO, J.; XU, L.A. cytosolic glucose-6-phosphate dehydrogenase gene, ScG6PDH, plays a positive role in response to various abiotic stresses in sugarcane. **Scientific Reports**, v.4, p.3-10, 2019.

YOU, J.; CHAN, Z. ROS regulation during abiotic stress responses in crop plants. **Frontiers in Plant Science**, v.6, p.1092, 2015.

ZAHOOR, I.; HASAN, H.G.A.; KHURSHEED, A.; ALI, M.; AMIR, R.; ZARRAR, F. Molecular mechanism of drought tolerance in wheat. In: Climate Change and Food Security with Emphasis on Wheat. **Academic Press**, p.129-154, 2020.

ZHANG, Y.; YU, X.; CHEN, L.; JIA, G. Whole-plant instantaneous and short-term water-use efficiency in response to soil water content and CO<sub>2</sub> concentration. **Plant and Soil**, v.444, p.281-298, 2019.

ZHAO, D.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J.C. Comstock Sugarcane Leaf Photosynthesis and Growth Characters during Development of Water-Deficit Stress. **Crop Science**. n.53, p.1066-1075. 2013.

**PÁGINAS RESTRITAS**  
**40 A 90**