

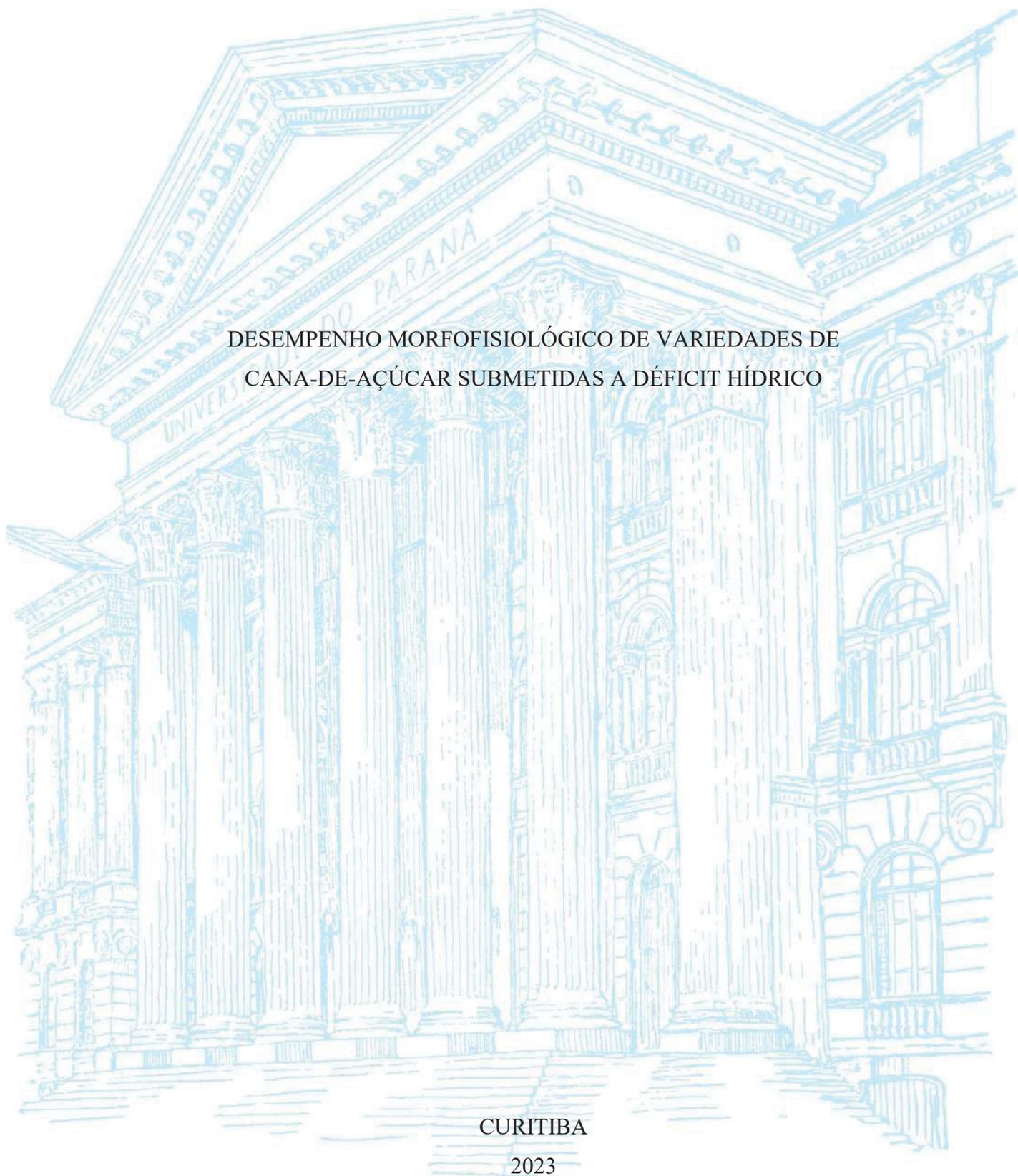
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANABEL APARECIDA OLIARSKI

DESEMPENHO MORFOFISIOLÓGICO DE VARIEDADES DE
CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO

CURITIBA

2023



ANABEL APARECIDA OLIARSKI

DESEMPENHO MORFOFISIOLÓGICO DE VARIEDADES DE
CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, Departamento de Fitotecnia e Fitossanidade, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Bernalhok Filho

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Oliarski, Anabel Aparecida

Desempenho morfofisiológico de variedades de cana-de-açúcar submetidas a déficit hídrico/ Anabel Aparecida Oliarski. – Curitiba, 2023.

1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal).

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Bepalhok Filho

1. Cana-de-açúcar. 2. Absorção. 3. Nutrição. 4. Irrigação. I. Bepalhok Filho, João Carlos. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal). III. Título.

Bibliotecária: Telma Terezinha Stresser de Assis CRB-9/944



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL) da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANABEL APARECIDA OLIARSKI** intitulada: **DESEMPENHO MORFOFISIOLÓGICO DE VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO**, sob orientação do Prof. Dr. JOÃO CARLOS BESPALHOK FILHO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 16 de Outubro de 2023.

Assinatura Eletrônica

16/10/2023 12:53:22.0

JOÃO CARLOS BESPALHOK FILHO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

16/10/2023 11:34:15.0

ADÍLSON HÄRTER

Avaliador Externo (SYNGENTA)

Assinatura Eletrônica

16/10/2023 11:26:28.0

BRUNO PORTELA BRASILEIRO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho a Isabel Oliarski, ela que ressignifica a mim conceitos de vida sem saber. Nunca deixe de acreditar em você filha, nunca deixe de acreditar que é capaz de fazer qualquer coisa.

AGRADECIMENTOS

Pela força, perseverança e resiliência em seguir o caminho, mesmo quando pareciam se esgotar todas as alternativas.

A minha linda família, que nunca deixa de acreditar em mim.

Ao meu querido orientador Professor João Carlos Bessalho Filho, que continua confiando em meu potencial.

A Universidade Federal do Paraná e o Programa de Pós-graduação em Agronomia – Produção Vegetal, que abrem suas portas para eu possa ir mais longe.

A todos os mestres que fazem parte da minha formação até aqui nesta vida, principalmente aqueles que me incentivaram a prática da pesquisa científica.

À Grace, Daiane e Marcela, amigas e colegas que a cana me trouxe e que me apoiaram em cada passo dado de todas as formas possíveis. Ao Matheus que sempre estava a disposição para ajudar no que fosse preciso.

À RIDESA por fornecer o material necessário para execução do experimento.

Ao Laboratório de Micropropagação Vegetal e ao Laboratório de Ecofisiologia, especialmente ao Roger que me acompanhava incansavelmente pelas manhãs com o IRGA e nas demais análises fisiológicas. Ao Laboratório de Fitotecnia, especialmente à Maria Emília que me ajudou nas análises de raízes. Ao Laboratório de Mineralogia, especialmente à Maria que tão gentilmente me forneceu nitrogênio líquido inúmeras vezes. Todos forneceram estrutura e materiais imprescindíveis para elaboração deste, muito obrigada!

À Fundação da Universidade Federal do Paraná pela concessão da bolsa, fundamental para que eu permanecesse na execução desse trabalho.

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma se fizeram presentes, me incentivando e acreditando em mim para este trabalho.

“E começamos ver que o tempo somos nós.
Somos este espaço, clareira aberta pelos vestígios
da memória dentro das ligações dos nossos neurônios.

Nós somos memória.”

Carlo Rovelli

RESUMO

Destacando-se como a segunda commodity na produção global de alimentos primários, a cana-de-açúcar supre uma demanda mundial de 176 milhões de toneladas de açúcar e na crescente demanda por etanol. O déficit hídrico afeta a absorção de nutrientes, transporte de assimilados, regulação térmica, turgor, transpiração e outras cadeias de implicações, caracterizando-se o estresse abiótico que mais afeta os canaviais. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de variedades de cana-de-açúcar para características fisiológicas e morfológicas sob condições de déficit hídrico. Realizado no Setor de Ciências Agrárias da UFPR, utilizou-se mini toletes das variedades RB036088, RB867515, RB966928 e RB036152. Aos 21 dias após emergência (DAB) foram transferidas para estufa a 30°C sob nebulização. O transplântio ocorreu aos 47 DAB para vasos com substrato Carolina Soil®. Aos 89 DAB o tratamento sem irrigação teve suspensão das regas. Avaliou-se fotossíntese ($F(A)$), condutância estomática (g_s), taxa de transpiração (E), conteúdo relativo de água (CRA%), comprimento (CR) e volume (VR) de raiz e massa seca da planta (MSP) aos 125 DAB e altura de planta (AP), diâmetro do colmo (DC) e número de folhas (NF) aos 113 DAB e aos 125 DAB. O experimento foi instalado no delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 4 x 2 (variedade e irrigação). As características fisiológicas g_s e E apresentaram interação significativa entre variedades e irrigação. Não houve diferença estatística a 5% de significância entre variedades e irrigação para CRA% e $F(A)$. Aos 113 DAB houve diferença significativa entre variedades para as características DC e NF e aos 125 DAB para DC, NF e MSP. Para o fator irrigação houve diferença significativa a 5% de probabilidade para todas as características mensuradas aos 125 DAB, exceto MSP. A variedade RB036152 apresentou média inferior para DC nos dois dias de avaliação, não diferindo estatisticamente da RB867515. A RB966928 destacou-se aos 113 DAB com maior NF, mantendo o maior NF aos 125 DAB, diferindo da RB867515. Aos 125 DAB o tratamento sem irrigação resultou em médias de AP, DC e NF abaixo do tratamento com irrigação. Houve diferença estatística a 5% entre as variedades para CR e VR. Para o fator irrigação houve diferença estatística apenas para CR. Para as médias de CR destacam-se as variedades RB867515 e RB966928 em relação a RB036088 e RB036152. Para VR a RB867515 obteve média superior. O desempenho de variedades de cana-de-açúcar foi afetado quando submetidas à período de estresse hídrico, em que a condição de estresse imposta por restrição de água afetou as características morfofisiológicas condutância estomática, taxa de transpiração, altura de plantas, diâmetro de colmo e número de folhas, exceto a taxa de fotossíntese e conteúdo relativo de água nas folhas.

Palavras-chave: *Saccharum* spp. Déficit de água. Tolerância à seca. Fatores abióticos. Estômato. Trocas gasosas.

ABSTRACT

Standing out as the second commodity in the global production of primary foods, sugar cane supplies a global demand of 176 million tons of sugar and the growing demand for ethanol. Water deficit affects the absorption of nutrients, transport of assimilates, thermal regulation, turgor, transpiration and other chains of implications, characterizing the abiotic stress that most affects sugarcane fields. The objective of this work was to evaluate the performance of sugarcane varieties for physiological and morphological characteristics under water deficit conditions. Carried out in the Agricultural Sciences Sector at UFPR, mini billets of the varieties RB036088, RB867515, RB966928 and RB036152 were used. At 21 days after emergence (DAB) they were transferred to glass-house 30°C under nebulization. Transplanting took place at 47 DAB into pots with Carolina Soil® substrate. At 89 DAB, the treatment without irrigation was suspended. Photosynthesis ($F(A)$), stomatal conductance (g_s), transpiration rate (E), relative water content (CRA%), root length (CR) and volume (VR) and plant dry mass were evaluated (MSP) at 125 DAB and plant height (AP), stem diameter (DC) and number of leaves (NF) at 113 DAB and 125 DAB. The experiment was carried out in a completely randomized design in a 4 x 2 factorial scheme (variety and irrigation). The physiological characteristics g_s and E showed a significant interaction between varieties and irrigation. There was no statistical difference at 5% significance between varieties and irrigation for CRA% and $F(A)$. At 113 DAB there was a significant difference between varieties for the characteristics DC and NF and at 125 DAB for DC, NF and MSP. For the irrigation factor, there was a significant difference at 5% probability for all characteristics measured at 125 DAB, except MSP. The variety RB036152 presented a lower average for DC on the two days of evaluation, not statistically different from RB867515. RB966928 stood out at 113 DAB with the highest NF, maintaining the highest NF at 125 DAB, differing from RB867515. At 125 DAB, the treatment without irrigation resulted in average AP, DC and NF below the treatment with irrigation. There was a 5% statistical difference between the varieties for CR and VR. For the irrigation factor, there was a statistical difference only for CR. For CR averages, the varieties RB867515 and RB966928 stand out in relation to RB036088 and RB036152. For VR, the RB867515 achieved a higher average. The performance of sugarcane varieties was affected when subjected to a period of water stress, in which the stress condition imposed by water restriction affected the morphophysiological characteristics stomatal conductance, transpiration rate, plant height, stem diameter and number of leaves, except the rate of photosynthesis and relative water content in leaves.

Keywords: *Saccharum* spp. Water deficit. Drought tolerance. Abiotic factors. Stoma. Gas exchange.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO POR PAÍS DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM TONELADAS.....	16
FIGURA 2 - PRODUTIVIDADES E ÁREA TOTAL COLHIDA DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL NOS ÚLTIMOS 10 ANOS.....	18
FIGURA 3 - PASSOS PARA OBTENÇÃO DE MUDAS DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA TESTE DE DÉFICIT HÍDRICO.	30
FIGURA 4 - AVALIAÇÕES DE CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS AO DÉFICIT HÍDRICO.	32
FIGURA 5 - CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA (g_s) E TAXA DE TRANSPIRAÇÃO (E) EM DIFERENTES VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR COM E SEM IRRIGAÇÃO.	35
FIGURA 6 - PLANTAS DE VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR AOS 125 DIAS APÓS A GERMINAÇÃO, COM E SEM IRRIGAÇÃO.....	39
FIGURA 7 - RAIZES DIGITALIZADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO.....	41

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. AVANÇOS DO MELHORAMENTO GENÉTICO COM GENÓTIPOS DESTAQUE DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO NOS ÚLTIMOS 5 ANOS.	20
TABELA 2. AVANÇOS DO MELHORAMENTO GENÉTICO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM IDENTIFICAÇÃO DE GENES RESPONSIVOS AO DÉFICIT HÍDRICO NOS ÚLTIMOS 5 ANOS.	22
TABELA 3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS UTILIZADOS NAS AVALIAÇÕES PARA TOLERÂNCIA À DÉFICIT HÍDRICO EM ESTUDOS SOBRE MELHORAMENTO DE CANA-DE-AÇÚCAR NOS ÚLTIMOS 5 ANOS.....	26
TABELA 4 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA (<i>G_s</i>), TAXA DE TRANSPIRAÇÃO (<i>E</i>) FOTOSSÍNTESE (<i>F(A)</i>) E CONTEÚDO RELATIVO DE ÁGUA (<i>CRA%</i>) ANALISADAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A PERÍODO DE DÉFICIT HÍDRICO.	34
TABELA 5 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS ALTURA DE PLANTAS (<i>AP</i>), DIÂMETRO DE COLMO (<i>DC</i>), NÚMERO DE FOLHAS (<i>NF</i>) E MASSA SECA DE PLANTAS (<i>MSP</i>) ANALISADAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO, AOS 115 E AOS 125 DIAS APÓS BROTAÇÃO.....	37
TABELA 6 – ALTURA DE PLANTAS (<i>AP</i>), DIÂMETRO DE COLMO (<i>DC</i>), NÚMERO DE FOLHAS (<i>NF</i>) E MASSA SECA DE PLANTAS (<i>MSP</i>) AVALIADAS AOS 113 E 125 DIAS APÓS A BROTAÇÃO DE MINITOLETES DE DIFERENTS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO.....	38
TABELA 7 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS COMPRIMENTO DE RAIZ (<i>CR</i>), VOLUME DE RAIZ (<i>VR</i>) ANALISADAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A PERÍODO DE DÉFICIT HÍDRICO.	40
TABELA 8 – COMPRIMENTO DE RAIZ (<i>CR</i>) E VOLUME DE RAIZ (<i>VR</i>) DE CANA-DE-AÇÚCAR, PARA DIFERENTES VARIEDADES, NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DE IRRIGAÇÃO.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	- Altura de plantas (cm)
CC	- Capacidade de campo
CO ₂	- Dióxido de carbono
CR	- Comprimento de raiz (cm)
CRA	- Conteúdo relativo de água (%)
DAB	- Dias após a brotação
DC	- Diâmetro do colmo (mm)
DH	- Déficit hídrico
<i>E</i>	- Taxa de transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
<i>F(A)</i>	- Taxa fotossintética ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
<i>gs</i>	- Condutância estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
MS	- Meio de Cultura de Murashige e Skoog
N ₂	- Nitrogênio
NF	- Número de folhas
VR	- Volume de raiz (cm^{-2})

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR	16
2.2	IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR	17
2.2	DÉFICIT HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR	18
2.1.1	Impactos do déficit hídrico à cultura	19
2.2	AVANÇOS DO MELHORAMENTO GENÉTICO	19
2.3	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS MENSURADAS	24
2.3.1	Conteúdo Relativo de Água	25
2.3.2	Trocas gasosas	27
2.3.3	Características biométricas da parte aérea	27
2.3.4	Características biométricas de raiz	28
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	OBTENÇÃO DAS MUDAS	29
3.1.1	Brotação	29
3.1.2	Crescimento	29
3.1.3	Preparação para o teste em déficit hídrico (DH)	30
3.2	CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS	31
3.2.1	Características Fisiológicas	31
3.2.2	Características Morfológicas	32
3.3	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS	34
4.1.1	Trocas gasosas	34
4.1.2	Conteúdo relativo de água	36
4.2	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS	37
4.2.1	Avaliações biométricas da parte aérea	37
4.2.2	Avaliações biométricas de raiz	40
5	CONCLUSÃO	43
6	RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Se destacando como a segunda commodity na produção global de alimentos primários com mais de 2 bilhões de toneladas, a cana-de-açúcar vem suprindo uma demanda mundial de mais de 176 milhões de toneladas de açúcar, com perspectiva de representar 85% da produção total de açúcar até 2032, em conjunto com a crescente procura de etanol como biocombustível (ISO, 2021; OECD & FAO 2023). É cultivada em mais de 100 países e o Brasil, maior produtor de cana-de-açúcar, prevê para a safra 2023/24 a colheita de 653 milhões de toneladas (FAO, 2012; CONAB, 2023b).

Em países como Tailândia, Colômbia, Egito e Etiópia a produtividade máxima chegou a atingir mais de 100 toneladas ha^{-1} , cenário contrário aos grandes produtores que mantêm as médias dos últimos anos na média de 80 toneladas ha^{-1} , em que longos períodos de estiagem são apontados frequentemente como fator limitante (MOORE & BOTHA, 2013; FAO, 2013; KHUMLA et al., 2021).

Com as complicações que o crescimento populacional e segurança alimentar impõem, somado às previsões de agravamento pela ciência sobre as mudanças climáticas, a agricultura passa a ter o desafio de suprir eficientemente a oferta de alimentos e de produtos com qualidade, se aliando às práticas sustentáveis e ao melhoramento genético de plantas no uso de genótipos superiores em produtividade (BEGNA, 2021; CRAMER, et al., 2021).

A água é essencial por estar presente em vários processos fisiológicos básicos dentro das células e o estresse causado pelo déficit deste elemento no solo afeta a absorção de nutrientes pelas raízes, transporte de assimilados nos tecidos, bem como da sua regulação térmica e do turgor que sustenta a morfologia e a transpiração por meio dos estômatos (TAIZ et al., 2017). Esses processos afetam o desempenho morfofisiológico e produtivo das plantas, se destacando como o estresse abiótico que mais afeta os canaviais nos países produtores de cana-de-açúcar (BAKKER, 1999; PIMENTEL, 2004; FAO, 2023a).

De acordo com o estágio de desenvolvimento e características genéticas, a intensidade, frequência e tempo de estresse hídrico proporcionado pelo meio, os impactos podem ser irreversíveis, refletindo nas características morfofisiológicas, seja de imediato e a longo prazo (BIANCHI, GERMINO & SILVA, 2016). Quando de forma extensa e/ou acentuada leva a deterioração e a disfunção dos componentes fundamentais das células vegetais, comprometendo seu funcionamento e em casos mais graves gerando a lise celular, e, portanto, afetando o desenvolvimento da planta ou diminuindo a expressão do seu máximo potencial genético e

consequentemente reduzindo a produtividade final da cultura (SANTOS & CARLESSO, 1998; ZILLIANI, 2019).

Relacionado ao êxito da indústria sucroenergética brasileira, o melhoramento genético em cana-de-açúcar nos últimos anos proporcionou o aumento da sua produtividade, no qual o objetivo visa o máximo desempenho da cultura com baixo custo (EMBRAPA, 2015). Explora-se a tolerância das plantas à estresses abióticos, desde as bases moleculares e estruturais, até as reações antioxidantes, a regulação osmótica e a ação dos hormônios, entendendo a dinâmica dos processos que ocorrem simultaneamente e em graus diferentes entendendo como as respostas são geradas, desde a percepção do estresse pela célula até sua reestabilização, favorecendo a adaptação das plantas aos fatores de produção e edafoclimáticos (COLLARES, 2018; DLAMINI, 2021).

O melhoramento genético vem trazendo com satisfação avanços na compreensão dos processos de tolerância, no desenvolvimento e indicação de variedades que se sobressaem às restrições hídricas, sendo um benefício para as constantes mudanças e necessidades emergentes que surgem a cada dia (ZILLIANI, 2019; DLAMINI, 2021).

O uso de variedades de cana-de-açúcar tolerantes ao déficit hídrico está relacionado à manutenção da produtividade nos canaviais em ambientes com longos períodos de estiagem e baixas taxas de precipitações e a mensuração das características morfofisiológicas a partir do desempenho de variedades sob estresse determina quais podem ser indicadas tolerantes, bem como quais caracteres de adaptação são comuns à planta na falta de água.

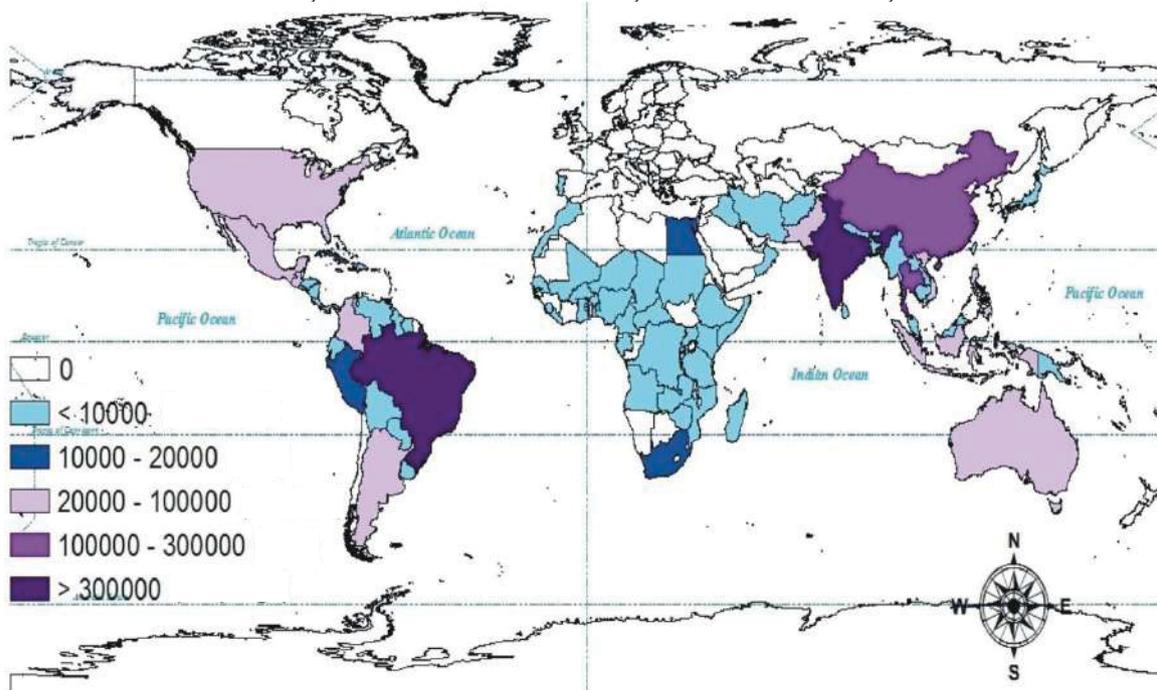
Portanto, no contexto apresentado, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de variedades de cana-de-açúcar, a partir da mensuração de características fisiológicas e morfológicas, quando submetidas ao déficit hídrico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) da família Poaceae é uma planta originária do sudoeste asiático, adaptada ao cultivo na região tropical e subtropical pelas condições edafoclimáticas favoráveis (FIGURA 1), com comportamento semiperene e crescimento em touceiras, raízes do tipo fasciculada, colmo com gemas, folhas alternadas opostas e inflorescência do tipo panícula (SILVA & SILVA, 2012; BONETT, 2014; RODRIGUES & ROSS, 2020).

FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO POR PAÍS DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM TONELADAS.



FONTE: ICAR - Indian Institute of Sugarcane Research (2019).

Esta gramínea tem sua implantação em canaviais através do colmo, na forma de toletes com duas ou três gemas, que são plantados em sulcos (AUDE, 1993). A brotação das gemas presentes nos toletes ocorre em até cinco semanas de acordo com disponibilidade de água e nutrientes no solo, temperatura do ar e do solo, variedade, posição da gema no colmo, profundidade de plantio e integridade do material vegetal utilizado (FAO, 2012; MOORE & BOTHA, 2013).

É uma planta com carboxilação C4 na fotossíntese que efetua o acúmulo de sacarose no colmo, principal característica que lhe confere importância comercial como matéria prima

para produção de açúcar e etanol, além do seu uso como fonte de bioenergia com a reutilização do bagaço de cana-de-açúcar gerado em altas quantidades nas usinas de açúcar e etanol (BAKKER, 1999; THOMAS, 2015).

2.2 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR

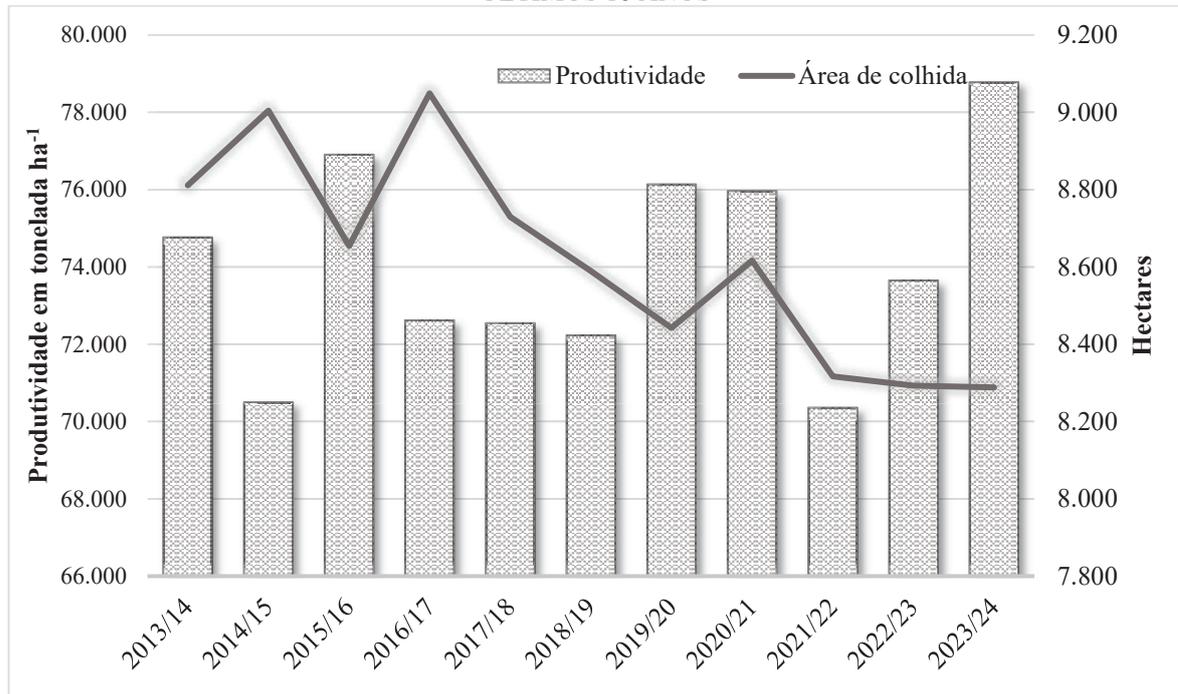
Um dos fatores que impulsiona a produção de cana-de-açúcar é a demanda global de açúcar, que neste ano cresceu 1,6 milhões de toneladas a mais que no mesmo período de 2022, previsto como principal adoçante a ser utilizado na próxima década, sobressaindo Brasil e Índia responsáveis por 61% da produção mundial de açúcar em 2023 (BHOSALE & BUREAU, 2021; FAO, 2023a; USDA, 2023; OECD & FAO, 2023).

Outro fator é a crescente demanda por combustível sustentável em alternativa ao uso de fontes fósseis, bem como os preços internacionais do petróleo bruto, que dobraram as produções de etanol na última década, destacando-se o Brasil na geração de etanol de cana-de-açúcar, representante de 26% da produção mundial (MARIN, VIANNA & NASSIF, 2019; AMIS, 2022; USDA, 2023; OECD & FAO, 2023).

O Brasil se destaca como maior produtor de cana-de-açúcar, que para a safra 2023/24 tem-se a estimativa de produção total de 652,9 milhões de toneladas, sendo 48% para açúcar e 52% para etanol (FAO, 2022; RFA, 2023; CONAB, 2023b). A destinação da produção de cana-de-açúcar nos países produtores funciona de acordo com as condições de preços atuantes no mercado, que por sua vez é determinado conforme as demandas mundiais por açúcar e etanol, bem como pelas estimativas de produção em que as condições climáticas são sempre destacadas como importante fator de variação (FAO, 2023b; USDA, 2023; CONAB, 2023b).

Considerando os últimos 10 anos a produtividade e área colhida de cana-de-açúcar (FIGURA 2), percebe-se que apesar da queda acentuada da área total colhida os valores de produtividade permanecem estáveis, mantendo o quadro positivo brasileiro para produção de cana-de-açúcar, em que o uso de materiais superiores gerados pelo melhoramento genético contribui efetivamente para esse cenário.

FIGURA 2 – PRODUTIVIDADES E ÁREA TOTAL COLHIDA DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL NOS ÚLTIMOS 10 ANOS



FONTE: CONAB, 2019; CONAB, 2022; CONAB, 2023a; CONAB, 2023b.

2.2 DÉFICIT HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR

Para expressar seu máximo potencial genético, a planta deve estar sob condições ideais de crescimento e desenvolvimento, o que não ocorre nos ambientes de cultivo onde as plantas estão expostas às oscilações abióticas, em que as limitações ambientais desencadeiam situações de compensações no seu metabolismo (TAIZ et al., 2017).

Embora a fase final de amadurecimento da cana-de-açúcar ser beneficiada com a escassez de água por aumentar as concentrações de sacarose armazenadas no colmo, especialmente nos meses anteriores à colheita, o contrário ocorre na fase inicial de desenvolvimento, os processos fisiológicos são prejudicados pelo déficit hídrico, ocasionando a redução da divisão celular, que leva a diminuição da área foliar, do número de folhas verdes, da taxa de alongamento de folhas e do diâmetro de colmos, bem como da emissão de novos perfilhos, do acúmulo de massa seca, e, conseqüentemente de biomassa; minimiza o potencial hídrico das folhas propiciando o fechamento dos estômatos e, por consequência disfunção osmótica; e também afeta processos bioquímicos principalmente os correlacionados ao estresse oxidativo na diminuição da ação de antioxidantes (ZILLIANI, 2019; MUÑOZ & TRUJILLO, 2020; TEIXEIRA, 2021).

A partir da percepção do estresse, surgem respostas em cascata, desde a transdução de sinal até a expressão gênica, gerando todas as respostas morfológicas, fisiológicas e bioquímicas (MANIMEKALAI et al., 2022). Esses processos são controlados por vários genes e sinalizadores de estresse, que são expressos de maneira diferente em cada genótipo, e, por isso, uma das medidas adotadas para minimizar as perdas causadas pelo déficit hídrico é a utilização de genótipos tolerantes (MOLINARI, 2006).

Härter (2021) destaca que variedades tolerantes ao estresse gerado pelo déficit hídrico apresentam enrolamento foliar, indução do crescimento radicular para aumentar a área na busca por água disponível no solo, inibição do crescimento do colmo, senescência e redução da área foliar.

2.1.1 Impactos do déficit hídrico à cultura

A FAO (2023b) vem apontando em seus levantamentos uma alta do preço do açúcar de 34,1% em relação ao mesmo período de 2022, pela preocupação que as faltas de chuvas na Índia e na Tailândia, ocorrentes com fenômeno El niño, afete a produção de açúcar nestes países que se destacam como maiores produtores depois do Brasil.

No Brasil, mesmo com a recuperação da produtividade da safra 2022/23 e estimativa de aumento de 6,9% para a safra 2023/24, apontadas sobre tudo pelas condições climáticas favoráveis, os levantamentos da Companhia Nacional de Abastecimento constatou quedas da produção em anos anteriores quando ocorreu principalmente períodos de seca, e por essa razão o estado responsável pela maior parte da produção total do país, apresentou queda de 14,4% na produtividade de cana-de-açúcar na safra 2021/22 em relação à safra anterior, em que observou-se a redução de entrenós e das taxas de produção de carboidratos (CONAB, 2019; CONAB, 2022; CONAB, 2023a; CONAB, 2023b).

2.2 AVANÇOS DO MELHORAMENTO GENÉTICO

Através de pesquisa efetuada nas bases de dados eletrônicas Web of Science e SCOPUS Elsevier, ponderando os últimos cinco anos e utilizando duas combinações com as palavras-chaves: sugarcane; *Saccharum*; drought tolerance; water deficit ou water deficiency; genetic improvement ou somente improvement, identificou-se as principais avanços e características morfofisiológicas de avaliação considerados nos estudos recentes publicados sobre melhoramento genético de cana-de-açúcar, que visam a tolerância das variedades ao

estresse hídrico em que se destacaram genótipos e genes com desempenho eficientes a partir de experimentos.

A Índia se sobressai com as publicações de genótipos com predisposição a tolerância à seca como evidenciado na TABELA 1, já que esse é um fator de impacto direto na produção de cana-de-açúcar no país (MOHANRAJ et al., 2021; RAM et al. 2021).

TABELA 1. AVANÇOS DO MELHORAMENTO GENÉTICO COM GENÓTIPOS DESTAQUE DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO NOS ÚLTIMOS 5 ANOS.

(continua)						
País	População tratamento	Ambiente	Estresse Hídrico	Genótipo(s) destaque	Principais avanços	Referência Ano
Brasil	6 cultivares	Campo em vasos	60 dias com umidade de 40-60% e 0-20%	RB92579	Menor alteração em suas características biométricas e fisiológicas	Júnior et al. (2019)
Brasil	IACSP97-7065 e IACSP94-2094	Ambiente controlado	21 dias sem irrigação	IACSP94-2094	Menor redução da assimilação de CO ₂ , eficiência de carboxilação estável e maior de DEGs	Contiliani et al. (2023)
China	30 híbridos	Controlado em vasos	Suspensão da irrigação por 15 dia	HE15-82	Metodologia classificou genótipos em forte, moderada e fraca tolerância à seca	Deng et al. (2019)
China	GXS87-16	Ambiente controlado (vasos)	Restrição de água por 9 dias	GXS87-16	Acumula rápido de osmoprotetores e hormônios vegetais com a redução de GA ₃ e alta atividade antioxidase	Li et al. (2021)
Egito	3 genótipos	<i>In vitro</i>	Uso manitol (C ₆ H ₈ OH ₆) no meio de cultura	GT-54-9	Alto grau de proliferação de calos e embriões, maior concentração de prolina nas células	Abdelsalam et al. (2021)
Índia	10 genótipos	Campo	Retenção da irrigação 45 dias após o plantio	Co 98014, Co 05011, Co 0238 Co 12029	Máxima eficiência no uso da água e manutenção superior de características fisiológicas	Dhansu et al. (2021)
Índia	14 clones	Campo	Suspensão de irrigação e sem precipitação por 60 dias	Co 850Co 85019 Co 98017 Co 0500719	Destaque na produção e rendimento comercial de cana quando submetidas a estresse hídrico.	Mahadevaiah et al. (2021)
Índia	15 clones	Campo	Déficit hídrico em condição de campo	CoM 0265, Co 06022, CYM 08-922, CYM 09-1369, GU 12-3, Clone IGH	Genótipos com maior capacidade de seccionar a matéria seca nos colmos sob estresse hídrico.	Mohanraj et al. (2021)

TABELA 1. AVANÇOS DO MELHORAMENTO GENÉTICO COM GENÓTIPOS DESTAQUE DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO NOS ÚLTIMOS 5 ANOS.

(conclusão)						
País	População tratamento	Ambiente	Estresse Hídrico	Genótipo(s) destaque	Principais avanços	Referência Ano
Índia	2 genótipos	Controlado em vasos	Suspensão de irrigação ambiente controlado (vasos) por 26 dias	IND 04-1335	143 metabólitos de controle a sintomas com maior acúmulo de açúcares, álcoois de açúcar, prolina e carotenoides.	Valarmathi et al. (2021)
Indonésia	3 cultivares	<i>In vitro</i>	Uso de PEG 6000 em meio de cultura	PS 862 e Bululawang	Mutantes irradiadas com baixas doses de raios gama obtiveram alguma tolerância	Hartati et al. (2021)
México	4 cultivares	<i>In vitro</i>	Uso de PEG 6000 em meio de cultura	Mex 69-290	Desenvolvimento de brotos, folhas, raiz, e MS superiores, bem como aumento de prolina.	Hernández-Pérez et al. (2021)

FONTE: A autora (2023).

Em relação ao tempo de restrições hídricas, diferentes tempos de duração do estresse são considerados, em que o ambiente em campo aberto apresentou maiores intervalos, chegando a 60 dias no experimento de Júnior et al. (2019), mantendo, conforme a classificação imposta, controle com 80 a 100% de umidade do solo, estresse moderado com a manutenção de 40 a 60% da umidade e estresse severo com manutenção de 0 a 20% da umidade.

Dheng et al. (2019) trazem em seu trabalho uma classificação dos híbridos estudados em forte, moderada ou fraca tolerância à seca, presente também nos outros artigos da China sobre o tema, conforme a abrangência dos genótipos ao déficit e desempenho dos principais componentes associados a este, já que a tolerância ao estresse hídrico é de caráter poligênico complexo, ou seja, está ligada a expressão de vários genes.

Nos cultivos *in vitro*, que objetivam principalmente a rapidez no processo de seleção de cultivares tolerantes à seca, os meios de cultura foram suplementados com compostos que dificultam a absorção de água pelas células, em que se destaca o uso PEG 6000.

Nos estudos com a identificação de genes responsivos de cana-de-açúcar ou de espécies selvagens do gênero *Erianthus*, a partir de extração de DNA e análise de expressão de genes utilizando as técnicas de PCR atuais, a Índia e a China, se destacam nas pesquisas recentes sobre ontologia e citogenética de expressão dos genes, como apresentado na TABELA 2.

Com o conhecimento obtido pelas técnicas de biotecnologia, os programas de hibridação e seleção se tornam mais precisos e ágeis e podem ser apontados na direção específica de tolerância de plantas. Também se destaca no desenvolvimento de marcadores, principalmente moleculares, muito úteis para identificação de indivíduos após cruzamentos e

nos processos de seleção genômica amplamente importantes para os processos e acompanhamentos dentro dos programas de melhoramento.

TABELA 2. AVANÇOS DO MELHORAMENTO GENÉTICO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM IDENTIFICAÇÃO DE GENES RESPONSIVOS AO DÉFICIT HÍDRICO NOS ÚLTIMOS 5 ANOS.

(continua)

País	População tratamento	Ambiente	Estresse Hídrico	Gene(s) destaques	Principais avanços	Referência Ano
Austrália	4 eventos transgênicos	Ambiente controlado (vasos)	Restrição de água por 21 dias	<i>TERF1</i>	O gene aumenta o acúmulo de osmoprotetores, diminuindo ROS e conteúdo de malondialdeído	Rahman et al. (2021)
China	Cultivar YZ05-51	Ambiente controlado	PEG-6000 a 10% em solução nutritiva	<i>ScTPS1</i> , <i>ScTPS5</i> , <i>ScTPS7</i>	<i>ScTPS1</i> endógenos envolvidos na biossíntese da trealose conferem tolerância	Hu et al. (2020)
China	2 cultivares	Controlado em câmaras de crescimento	PEG-6000 25% em solução nutritiva Hoagland	<i>ShMAPK07</i>	O gene <i>ShMAPK05</i> tem efeito negativo no estresse. O gene <i>ShMAPK07</i> teve papel positivo no estresse.	Ali et al. (2021)
China	Cultivar FN95-1702	Ambiente controlado (casa de vegetação)	6 dias de seca moderada e 12 dias de seca severa	<i>MYB 36</i> , <i>MYB 48</i> , <i>MYB 54 e</i> <i>MYB 61</i>	Genes <i>MYB</i> propensos a funcionar sob estresse regulando a reposta do metil jasmonato e do ácido abscísico.	Yuan et al. (2021)
China	4 eventos transgênicos	Ambiente controlado (vasos)	Restrição de água por 9 dias	<i>SoACLA-1</i>	A superexpressão do gene aumenta antioxidantes contra ROS e a sinergia com outros genes à nível transcricional	Zhu et al. (2021)
China	4 linhagens transgênicas partir da cv. FN95-1702	Ambiente controlado e a campo	Níveis de irrigação e exposição à campo	<i>TaDREB2B</i>	Maior rendimento e características agronômicas	Xiao et al. (2022)
China	Eventos transgênicos	In vitro	Uso de PEG 6000 em meio de cultura	<i>SsWRKY1</i>	Aumento da transdução de sinal MAPK, do gene de biossíntese ABA, P5CS e sistema de eliminação de ROS SOD, POD e CAT	Shen et al. (2023)
Colômbia	5 genótipos	Ambiente controlado	Restrição de irrigação seguida de inundação	CC 01-1940	Identificaram 3.633 genes expressos sob estresse hídrico somente no genótipo tolerante	Trujillo-Montenegro et al. (2021)
Índia	Co 94008	Ambiente controlado (vasos)	Retenção hídrica por 12 dias	<i>ARR-B</i> , <i>GRAS</i> , <i>NAC</i> <i>Homeobox</i> <i>L Zip</i> , <i>MYB</i> ,	Fatores de transcrição se destacaram indicando alterações no transcriptoma de cana-de-açúcar	Dapanage & Bhat (2020)

TABELA 2. AVANÇOS DO MELHORAMENTO GENÉTICO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM IDENTIFICAÇÃO DE GENES RESPONSIVOS AO DÉFICIT HÍDRICO NOS ÚLTIMOS 5 ANOS.

País	População tratamento	Ambiente	Estresse Hídrico	Gene(s) destaques	Principais avanços	Referência Ano
Índia	11 eventos transgênicos e controle	Casa de vegetação em vasos	Retenção da irrigação por 15 dias	<i>EaGly III</i>	Eficiência fotossintética, conteúdo relativo de clorofila e prolina e água, atividades de enzimas antioxidantes e de microestruturas radiculares	Mohanan et al. (2020)
Índia	1 híbrido de cana e 1 genótipo de <i>Erianthus</i>	Ambiente controlado (vasos)	Restrição de água por 10 dias	<i>EaNf-YB2</i>	O gene é candidato a superexpressão em cana-de-açúcar através da engenharia genética	Peter et al. (2020)
Índia	2 genótipos	Controlado em vasos	Suspensão da irrigação por 10 dias	Co 06022	Identificou genes envolvidos em processos importantes que podem atuar nos mecanismos de defesa	Selvi et al. (2020)
Índia	32 eventos transgênicos	Ambiente controlado (vasos)	Retenção de água por 10 dias	<i>EaEXPA1</i>	A superexpressão do gene obteve sucesso na ausência de sintomas em condições de estresse hídrico	Narayan et al. (2021)
Índia	Co 86032 e <i>E. arundinaceus</i>	Ambiente controlado	Retenção de água por 10 dias	<i>ShNF-YA5</i> , <i>ShNF-YB2g</i>	9 genes NF-YA 18 NF-YB e 24 genes NF-YC, e padrões de expressão diferencial dos genes ShNF-Y em folhas e raízes sob estresse	Swathik et al. (2023)
Taiândia	159 acessos de cana-de-açúcar	Campo	Condições de precipitação com irrigações controle	19 genes pleiotrópicos	197 associações marcador-característica (MTAs) responsáveis pelas características fenotípicas em cana-de-açúcar destaque sob estresse hídrico	Wirojsirasak et al. (2023)

Fonte: A autora (2023).

Ali et al. (2021) destacam não só um gene responsivo positivo, mas um negativo no desempenho das plantas de cana-de-açúcar submetidas a estresse hídrico, em que o gene ShMAPK07 de cana-de-açúcar se destaca positivamente e o gene ShMAPK05 negativamente, porém, com respostas inversas para estresse com ácido salicílico que induzia estresses hormonais. Esses genes são importantes na síntese de proteínas quinases ativadas por mitógenos (MAPKs), importantes na transdução de sinais celulares, mas que ainda tem função específica desconhecida nas respostas ao estresse em plantas de cana-de-açúcar (ALI et al., 2021).

Narayan et al. (2021) inseriram na variedade Co 86032 por meio de *A. tumefaciens* o gene α -expansina 1 (EaEXPA1) de *Erianthus arundinaceus*, que confere alta tolerância à seca

na espécie selvagem, e relata que os eventos transgênicos submetidos a estresse apresentaram sintomas leves de murcha ou nenhum sintoma, indicando que a superexpressão do gene é efetiva para uso nos programas de melhoramento genético.

O gene ScTPS é antagonista na produção de trealose e pode desempenhar um papel importante no combate ao estresse hídrico, salino e térmico, já que as plantas de cana-de-açúcar que aumentam a produção desse dissacarídeo elevando a proteção de proteínas e da membrana celular, mantém a pressão osmótica intracelular estável durante o estresse hídrico (HU et al., 2020; YUAN et al., 2021).

Os genes responsivos positivos aumentam em todos os experimentos a tolerância ao déficit hídrico em cana-de-açúcar, sendo candidatos notáveis a serem utilizados nos programas de melhoramento para desenvolvimento de novas variedades e transgênicos.

2.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS MENSURADAS

Para compreensão dos impactos e de cada resposta da cana-de-açúcar quando em déficit hídrico, são realizadas análises morfológicas, fisiológicas e genéticas, considerando as diferentes fases de desenvolvimento, a intensidade de regas e até mesmo ausência de água, seja em ambiente aberto ou em ambientes controlados em que se simule condições reais de precipitação.

De forma geral, conforme os estudos selecionados dos últimos cinco anos, os genótipos e os genes apresentados conferem desenvolvimento e crescimento fisiológico superiores, eficiência na utilização de água e maior acúmulo de açúcares e osmorreguladores, e se evidenciam na TABELA 3 como características de avaliação, respectivamente, conteúdo relativo de água, prolina e malondialdeído.

Dentre as respostas metabólicas da planta ao estresse hídrico, um dos modos de ação envolve a proteção da desidratação das células, com o suporte de osmorreguladores, e a prolina está diretamente associada a manutenção do potencial osmótico dentro dos tecidos (HANDA et al., 1986; TAIZ et al., 2017). A partir do acúmulo propiciado pelo distúrbio, este aminoácido sintetizado em diferentes locais da célula, sendo uma das rotas a partir do glutamato via P5C, mantém a osmolaridade da célula protegendo a membrana e estruturas proteicas, conservando o funcionamento dos processos metabólicos atuando como antioxidante (RUDOLPH et al., 1986; MOLINARI, 2006; TAIZ et al., 2017).

O dialdeído malônico ou ácido malondialdeído (MDA) é outro composto de destaque, por ser um dos produtos da peroxidação lipídica da membrana que ocorre pelo acúmulo em

excesso de radicais livres na célula quando em condições de estresse hídrico, denominadas espécies reativas ao oxigênio (EROs), que reagem com proteínas, ácidos nucleicos, carboidratos e lipídeos, interferindo no seu funcionamento até a morte celular, e, portanto, menores concentrações de MDA em condições de estresse hídrico indicam plantas com tolerância à seca (MOLINARI, 2006; SACHDEV, et al., 2021).

2.3.1 Conteúdo Relativo de Água

O conteúdo ou teor relativo, normalmente avaliado em folhas, é uma característica fisiológica que determina a quantidade de água no tecido vegetal comparado com a sua capacidade máxima de absorção, ou seja, quando turgido (TAIZ et al., 2017).

É uma característica avaliada em 11 dos 18 artigos que efetuaram experimentos com déficit hídrico e cada autor seguiu uma metodologia diferente na avaliação, por ser indicador conceitual fácil para determinar o estado da água em plantas e está correlacionado a quantidade de umidade nas folhas, em que altas porcentagens nos estágios iniciais de desenvolvimento indica rápido e efetivo crescimento da cana-de-açúcar (BAKKER, 1999; WELBAUM, 2013).

Li et al. (2021) seguiram o protocolo de Silva et al. (2007). Rahman et al. (2021) e Deng et al. (2019) seguiram método descrito em seus trabalhos. Narayan et al. (2021) adotaram o protocolo de Barrs & Weatherley (1962). Dhansu et al. (2021) utilizaram o método de Weatherley (1950). Mohanan et al. (2020) e Dapanage & Bhat (2020) seguiram metodologias mais recentes com adaptações a partir da metodologia de Weatherley (1950).

Em alguns trabalhos, como em Contiliani et al. (2023), tem-se a avaliação do potencial hídrico foliar por meio de câmaras de pressão ou psicrômetro termopar, mais preciso que o conteúdo relativo de água por determinar o fluxo de água dentro dos tecidos, porém, o uso de equipamentos específicos, limita a aplicação dessa variável.

TABELA 3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS UTILIZADOS NAS AVALIAÇÕES PARA TOLERÂNCIA À DÉFICIT HÍDRICO EM ESTUDOS SOBRE MELHORAMENTO DE CANA-DE-AÇÚCAR NOS ÚLTIMOS 5 ANOS.

Referência, ano	CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS MENSURADAS											
	Açúcares	Coloração foliar	Conteúdo relativo de água	Conteúdo de clorofila	Conteúdo de MDA	Conteúdo de prolina	Glicina Betaina	Altura e/ou diâmetro de colmo	Massa seca	Umidade do solo/substrato	Trocas gasosas	Termostabilidade da membrana
Deng et al., 2019	X		X		X	X						
Júnior et al., 2019									X	X	X	
Dapanage; Bhat, 2020			X			X				X		
Mohanan et al., 2020	X		X	X	X						X	X
Abdelsalam et al., 2021			X			X						
Dhansu et al., 2021			X	X					X		X	
Hernández-Pérez et al., 2021						X	X					
Li et al., 2021			X		X	X				X		
Mahadevaiah et al. (2021)								X				
Mohanraj et al., 2021			X		X			X		X		
Narayan et al., 2021			X	X				X			X	X
Rahman et al., 2021	X		X	X		X	X					
Valarmathi et al., 2021			X	X								
Zhu et al., 2021	X	X			X	X				X		
Xiao et al., 2022	X	X	X	X	X			X				
Contiliani, et al., 2023											X	
Shen et al., 2023			X		X							
Wirojsirasak et al., 2023	X							X				
TOTAL	6	2	11	6	7	8	2	4	3	4	5	2

FONTE: A autora (2023).

2.3.2 Trocas gasosas

As trocas gasosas estão diretamente a atividade dos estômatos. O potencial de água dentro da planta afeta a abertura e o fechamento dessas estruturas que por estarem diretamente em contato com a atmosfera reflete prontamente na capacidade da planta em realizar essas trocas com o meio, principalmente em relação à absorção de CO₂ e liberação de água e O₂, ocorrendo também como uma resposta à manutenção de água nos tecidos vegetais e concomitantemente na atividade de transpiração da planta, já que 97% da água é liberada via transpiração (BAKKER, 1999; TAIZ et al., 2017). Mesmo que em plantas de carboxilação C4 ocorra o estoque de CO₂ no mesófilo, o fechamento dos estômatos interrompe sua absorção, acometendo diretamente a atividade fotossintética (MAIA JÚNIOR, 2017).

Mohanan et al. (2020) aferiram eficiência fotoquímica, radiação fotossinteticamente ativa e taxa de transporte de elétrons analisando as trocas gasosas em folhas de cana-de-açúcar com um sistema fotossíntese portátil modelo Li-6400, Li-COR Inc., determinando taxa de fotossíntese, taxa de transpiração e condutância dos estomática. Contiliani et al. (2023), utilizaram em seu experimento um analisador de gás infravermelho, em que aferiu juntamente com as trocas gasosas a fluorescência da clorofila. Esses equipamentos permitiram a esses autores correlacionarem as aferições da atividade de condutância estomática e da taxa de transpiração, que por sua vez afetam a taxa de fotossíntese de cana-de-açúcar quando submetidas a déficit hídrico.

2.3.3 Características biométricas da parte aérea

Caracterizando a morfologia da parte aérea, tem-se medições de altura, contagem de folhas, área foliar e determinação da matéria fresca e seca. Considerando avaliação de colmos tem-se taxa de perfilhamento, número, diâmetro e comprimento de entre nós, seja de uma planta quando em crescimento inicial ou selecionando colmos de plantas já estabelecidas em fase de amadurecimento (BAKKER, 1999; WELBAUM, 2013).

Essas características podem ser aferidas por meio de utensílios graduados, balanças, seja da própria parte de interesse da planta ou até com a utilização de programas de análise de imagens (MAHADEVIAH et al., 2021; MOHANRAJ et al., 2021; XIAO et al., 2022; WIROJSIRASAK et al., 2023).

2.3.4 Características biométricas de raiz

Órgão responsável diretamente na absorção de água e nutrientes do solo, o seu comportamento pode vir auxiliar na compreensão de respostas que amenizem os impactos negativos causados pelo estresse hídrico, em que conforme o nível de estresse por falta de água sofrido pela planta, maior o crescimento de raiz em profundidade (MAURI, 2012; DENG et al., 2019).

A aferição de características morfofisiológicas de raiz é importante, pois, conforme a intensidade e quantidade de tempo de estresse por baixa disponibilidade de água, tem-se diferentes padrões de distribuição de raiz no perfil do solo, ocorrendo conforme as características de adaptação específicas de cada genótipo, principalmente nos períodos de pós estresse, comuns em condições de campo com as precipitações irregulares, em que esses padrões de recuperação de raiz determinam o desempenho da cana-de-açúcar no seu amadurecimento e produtividades finais (SET-TOW, SONGSRI, & JONGRUNGKLANG, 2020).

Mohanan et al. (2020) além de aferirem características bioquímicas da raiz, como quantidade de malondialdeído, também efetuaram a comparação anatômica, em que eventos transgênicos apresentaram raízes com estruturas estáveis após 15 dias sem irrigação. Deng et al. (2021) aferiram para raiz conteúdo de prolina e malondialdeído e a viabilidade de raiz a partir da determinação da atividade da desidrogenase.

Na maioria dos trabalhos encontrados, quando considerada a avaliação das características biométricas de raiz, a massa seca de raiz se destaca, efetuada principalmente pela facilidade de execução, com a permanência das amostras em temperaturas de 48 a 96 horas e de 60 a 75 °C, ou até obtenção de peso constante dos materiais (MOHANAN et al., 2020; DENG et al., 2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Departamento de Fitotecnia e Fitossanidade, no Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR. Utilizou-se mini toletes de colmo com 10 meses de idade das variedades RB036088, RB867515, RB966928 e RB036152, cedidas pela Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA), da Estação Experimental de Paranaíba-PR.

As análises de características fisiológicas foram efetuadas no Laboratório de Ecofisiologia e as análises de características biométricas da raiz e secagem de plantas no Laboratório de Fitotecnia.

3.1 OBTENÇÃO DAS MUDAS

3.1.1 Brotação

Os minis toletes foram posicionados com a gema à mostra sob o substrato Carolina Soil® dentro de bandejas plásticas (FIGURA 3B) protegidas da luz com sacos plásticos pretos e mantidos em sala de crescimento com temperatura de 25 ± 2 °C em substrato úmido. 15 dias após a brotação das gemas (DAB), foram expostas à luz em um fotoperíodo de 16 horas na mesma sala de crescimento.

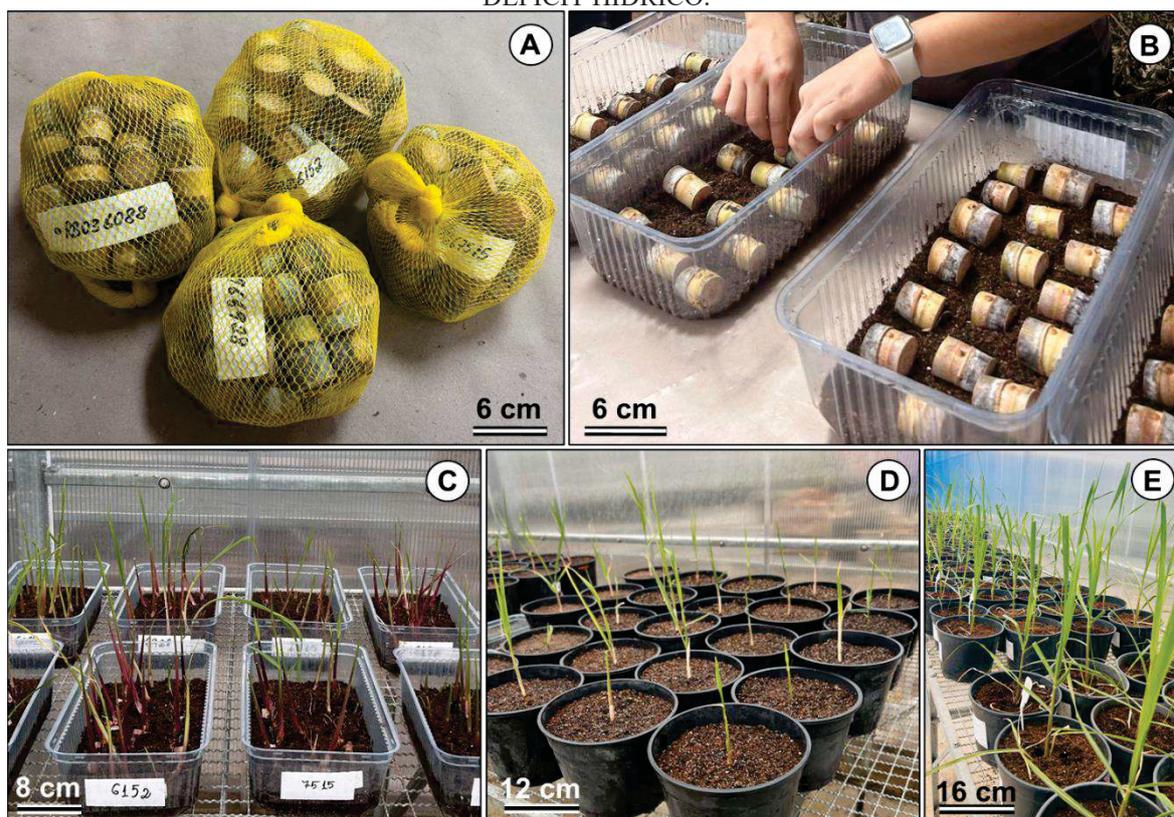
3.1.2 Crescimento

As bandejas foram transferidas para estufa aos 21 DAB, com temperatura máxima de 30 °C graus e 60% de umidade sob nebulização. Aos 47 DAB, com tamanho e enraizamento estabelecidos em todas as mudas brotadas (FIGURA 3C), essas foram transplantadas para vasos plásticos pretos de 5 litros (FIGURA 3D), com o substrato Carolina Soil®, que contém em sua composição principalmente turfa de sphagnum, perlita expandida, vermiculita expandida, e casca de arroz torrefada, com capacidade de retenção de água, conforme determinado por Franceschi et al. (2018) de $32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

3.1.3 Preparação para o teste em déficit hídrico (DH)

Aos 89 DAB, houve a suspensão da nebulização dentro da estufa e adubação com cinco mililitros de macro e micronutrientes do meio MS (MURASHIGE & SKOOG, 1962) com vitaminas e ajuste de pH a 5,8 em cada vaso.

FIGURA 3 – PASSOS PARA OBTENÇÃO DE MUDAS DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA TESTE DE DÉFICIT HÍDRICO.



FONTE: A autora, 2023.

LEGENDA: A) Recebimento dos minis toletes das variedades RB036088, RB867515, RB966928 e RB036152; B) Plantio dos toletes em bandejas plásticas com substrato Carolina Soil®; C) Mudanças de cana-de-açúcar em estufa aos 21 DAB; D) Transplântio das mudas para vasos de 5 litros com substrato Carolina Soil®; E) Crescimento das canas aos 89 DAB em vasos.

Anterior ao período em déficit hídrico, todos os vasos foram regados com água até o início de escoamento. Após o escoamento do excesso de água, houve a pesagem destes vasos aferindo seu peso em capacidade de campo (CC). Para o tratamento com manutenção da irrigação, a cada 4 dias os vasos eram pesados novamente e a quantidade de água subtraída era restituída para constância da CC. Nos vasos do tratamento sem irrigação, houve a suspensão das regas.

Aos 113 DAB, quando a maioria dos vasos com ausência de irrigação atingiram peso menor que o peso aferido em capacidade de campo, iniciou-se as avaliações morfofisiológicas até 125 DAB. Ao final, o tratamento sem irrigação permaneceu 36 dias sem regas.

3.2 CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS

As avaliações das características fisiológicas condutância estomática (gs), taxa de transpiração (E), fotossíntese ($F(A)$) e conteúdo relativo de água ($CRA\%$) nas folhas juntamente com as características morfológicas comprimento (CR) e volume (VR) de raiz e massa seca de plantas (MSP), foram aferidos ao final do experimento aos 125 DAB.

As características morfológicas altura de planta (AP), diâmetro do colmo (DC) e número de folhas (NF) foram medidos no dia 113 e aos 125 DAB.

Para as características para $F(A)$, gs , E e $CRA\%$ seguiu-se delineamento inteiramente casualizado, disposto em esquema fatorial 4×2 (variedade e irrigação), em que continham 2 repetições escolhidas aleatoriamente, cada parcela constituída por uma planta. Para as características CR , VR , AP , DC , NF e MSP seguiu-se delineamento inteiramente casualizado, disposto em esquema fatorial 4×2 (variedade e irrigação) com 8 repetições, totalizando 64 plantas.

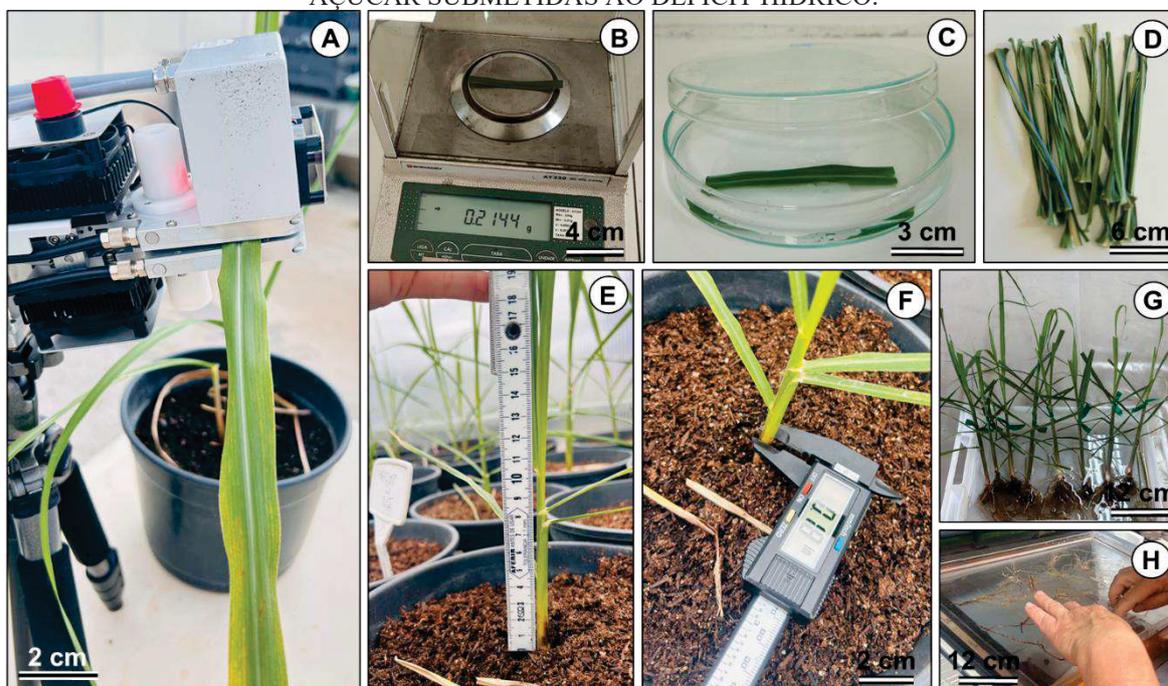
3.2.1 Características Fisiológicas

Para coleta de dados de $F(A)$, gs em e E utilizou-se um analisador de gás infravermelho (IRGA) Heinz Walz GmbH, modelo 3055-FL com lâmina de 4 milímetros, temperatura de 20°C e intensidade luminosa de $1.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ dentro da câmara foliar (FIGURA 4A), com aferições entre 8:30 e 12:30 horas, utilizando a folha +1 de cada planta.

Para quantificação do $CRA\%$ nas folhas, amostras de aproximadamente 7 cm^2 das folhas +2 de cada planta foram coletadas e pesadas em balança analítica de precisão (FIGURA 4B) imediatamente para determinação do peso fresco ($P1$). Estas permaneceram em placas de petri com água destilada (FIGURA 4C) por 24 horas no escuro e pesadas novamente para determinação do peso turgido ($P2$). Depois de permanecer em estufa a 75°C por 48 horas, houve nova pesagem para obtenção do peso seco ($P3$). O $CRA\%$ foi definido a partir da seguinte equação proposta por Weatherley (1950):

$$CRA\% = \left[\frac{(P1 - P3)}{(P2 - P3)} \right] \times 100$$

FIGURA 4 – AVALIAÇÕES DE CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS AO DÉFICIT HÍDRICO.



FONTE: A autora, 2023.

LEGENDA: A) analisador de gás infravermelho (IRGA) Heinz Walz GmbH modelo 3055-FL; B) determinação de peso fresco de amostras de folhas +2 de cana-de-açúcar; C) Amostra em placa de petri com água destilada; D) Amostra de folhas após secagem; E) Aferição da altura de plantas com escala métrica de fibra; F) Aferição do diâmetro de colmo com paquímetro digital; G) Plantas após teste de DH com raiz lavada em bandejas plásticas com água; H) organização das raízes em scanner.

3.2.2 Características Morfológicas

Para contagem de NF considerou-se todas as folhas da base da planta até a bainha aparente da folha +1. AP foi aferida com escala métrica de fibra graduada em milímetros (FIGURA 4E), indo da base da planta até a bainha aparente da folha +1 e para DC utilizou-se paquímetro digital de 150 mm (FIGURA 4F).

Ao finalizar as avaliações aos 125 DAB, as plantas foram tiradas dos vasos e as raízes foram lavadas com água corrente para retirada do excesso de substrato (FIGURA 4G). Depois de uma segunda lavagem em água corrente, as raízes foram digitalizadas em scanner Epson Expression 11000XL (FIGURA 4H) e as análises de CR e VR foram aferidas pelo software WinRHIZO.

Após a análise de raiz, juntamente com a parte aérea as plantas foram secas em estufa a 65 °C até obtenção de peso constante e com a pesagem em balança de precisão determinou-se massa seca dos materiais.

3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados de todas as características mensuradas foram submetidos a análise de variância (ANOVA), que mediante constatação de diferença significativa as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. Para todos os testes estatísticos foi adotado o nível de significância de 5%, utilizando o *software* estatístico R. Os dados da variável NF foram transformados utilizando a raiz quadrada de $x + 0,5$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS

Foi observada diferença estatística para a característica fisiológica *gs* nos níveis de variedade e irrigação, juntamente com *E*, em que apresentaram interação significativa entre variedade \times irrigação ($V \times I$), conforme demonstra o resumo da ANOVA na TABELA 4.

TABELA 4 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA (*GS*), TAXA DE TRANSPIRAÇÃO (*E*) FOTOSÍNTESE (*F(A)*) E CONTEÚDO RELATIVO DE ÁGUA (*CRA%*) ANALISADAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A PERÍODO DE DÉFICIT HÍDRICO.

FV	GL	Quadrados Médios			
		CE	E	F(A)	CRA%
Variedade (V)	3	1816,08 *	0,035 ^{ns}	24,15 ^{ns}	62,5 ^{ns}
Irrigação (I)	1	947,10 *	0,043 ^{ns}	37,30 ^{ns}	25,0 ^{ns}
V x I	3	1450,93 *	0,132 *	16,77 ^{ns}	33,2 ^{ns}
Resíduo	8	82,51	0,012	7,71	20,8
Com Irrigação	3	1908,34 *	0,139 *	-	-
Sem Irrigação	3	1358,66 *	0,028 ^{ns}	-	-
RB966088	1	4316,49 *	0,366 *	-	-
RB867515	1	166,41 ^{ns}	0,003 ^{ns}	-	-
RB036920	1	96,04 ^{ns}	0,001 ^{ns}	-	-
RB036152	1	720,92 *	0,070 *	-	-
Média		69,66	9,82	0,67	90,5
CV (%)		13,04	16,76	28,19	5,03

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: * significativo e ^{ns} não significativo, ambos a 5% de probabilidade de erro. FV: Fator de variação; GL: Graus de liberdade.

As características fisiológicas *F(A)* e *CRA%* não apresentaram diferença estatística a 5% de significância entre os níveis de variedade e irrigação e para a interação entre variedade \times irrigação ($V \times I$).

4.1.1 Trocas gasosas

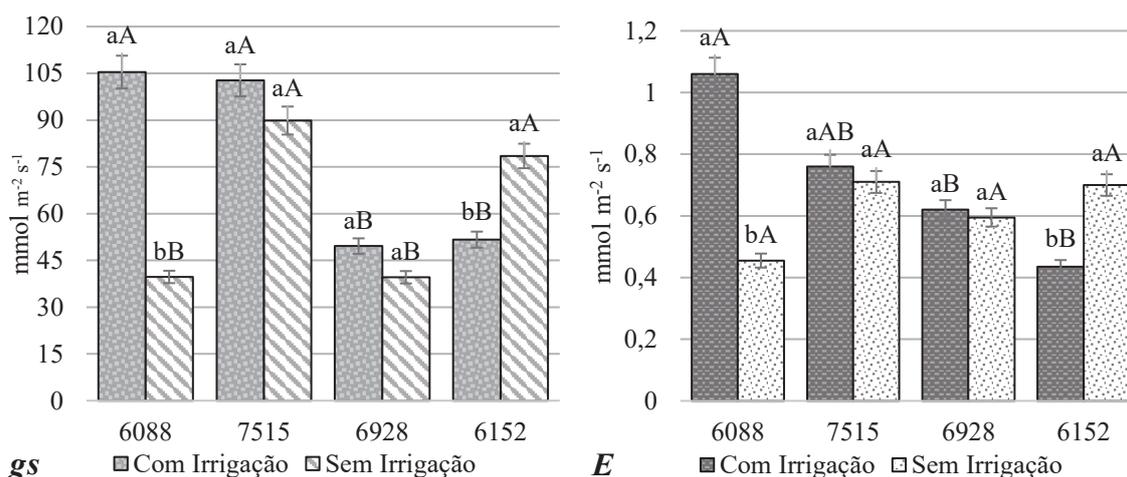
A tolerância de variedades de cana-de-açúcar pode se apresentar com a manutenção de *F(A)*, mesmo com menores valores de *gs* e *E*, como resposta de adaptação ao estresse (SIMÕES et al., 2019). Apesar de *gs* e *E* se demonstrarem significativos para este experimento, a característica fisiológica *F(A)* ao ser não significativo a 5% de probabilidade, pode indicar tolerância dessas variedades para DH, para a situação de estresse imposta,

diferente do observado por Barboza (2016) ao relacionar a atividade da g_s e da E da cana-de-açúcar em função do potencial hídrico das plantas, que associa baixas taxas de $F(A)$ diretamente com o funcionamento dos estômatos (g_s) e da eficiência da atividade de transpiração (E) pela planta, que por sua vez respondem às intensidades de estresse, em que quando mais acentuadas, tem-se diminuições das taxas de $F(A)$.

Outro aspecto a ser ponderado, é a particularidade fotossintética da cana-de-açúcar, assim como de todas as plantas que se diferenciam na eficiência do processo C_4 , em que o mesofilo estoca CO_2 , mantendo as taxas de $F(A)$ mesmo com o fechamento dos estômatos, e, portanto, não gerando danos característicos de DH, antes deste ocorrer de forma acentuada (TAIZ et al., 2017).

Ao compararmos as médias das variedades de cana-de-açúcar para a característica g_s temos desempenho inferiores para as variedades RB966928 e RB036152 com 49,6 e 51,65 $mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ respectivamente, quando comparadas com a RB036088 e RB867515 que não se diferenciam entre si com as médias de 105,4 e 102,75 $mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$, respectivamente (FIGURA 5 g_s). Em cultivo à campo em sequeiro entre variedades de cana-de-açúcar, no ponto auge de DH constatado por Rodolfo Júnior et al. (2016) a RB867515 apresentou g_s máximo de 240 $mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$.

FIGURA 5 – CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA (g_s) E TAXA DE TRANSPIRAÇÃO (E) EM DIFERENTES VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR COM E SEM IRRIGAÇÃO.



FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais não diferem médias entre tratamentos de irrigação e letras maiúsculas iguais não diferem médias entre variedades, ambas de acordo com o teste Tukey a 5% de probabilidade.

A redução de 63% da média da variedade RB036088 em g_s em relação à sua média no tratamento com irrigação, compreende-se sua responsividade ao fator de variação

irrigação, bem como para a característica fisiológica E , com a menor média em DH de 0,45 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e com a média de destaque sob condição de irrigação de 1,06 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (FIGURA 5E), comprovando a relação direta que a atividade dos estômatos tem sobre a transpiração em estresse por menor disponibilidade de água.

Chanaphai et al. (2023) concluíram em seu trabalho com genótipos de cana-de-açúcar submetidas a condições de seca, avaliando as respostas de características fotossintéticas, que as plantas que apresentam o melhor controle de g_s sob estresse, eram tolerantes ao DH. Seguindo essa linha de conclusão para esse estudo, as variedades RB867515 e RB966928, por manterem médias iguais de g_s para as duas condições de irrigação, podem ser consideradas tolerantes ao DH.

4.1.2 Conteúdo relativo de água

Xiao et al. (2022) obtiveram médias decrescentes de CRA%, com percentual menor de 80% para a variedade mais utilizada de cana-de-açúcar na China, sob DH severo por 15 dias. Em condições de campo, a variedade RB867515 se sobressaiu com as médias atingindo no período crítico de DH, 89,98% de CRA, se mostrando menos sensível ao estresse (SILVA, et al. 2015a). Esses resultados diferem do obtido neste trabalho, em que a análise estatística para CRA% não foi significativa para nenhum dos fatores, mas corroboram com os de Marcos et al. (2018) que também apresentam não significância para CRA% ao avaliar a tolerância de cana-de-açúcar com 55 DAB em DH para a variedade IACSP94-2094, obtidas com a brotação de mini toletes, considerada tolerante em ambientes com escassez de água.

Com a facilidade de execução da metodologia, o CRA% pode se demonstrar insensível ao estado de água real na planta, podendo subestimar o potencial hídrico vegetal, bem como do fluxo de água dentro dos tecidos, em que sua porcentagem é totalmente dependente da intensidade e intervalo total de DH (WELBAUM, 2013). Ainda assim, a estabilidade do funcionamento do metabolismo vegetal pode ser indicada por altas porcentagens de CRA%, expressando a tolerância da planta sob condição de estresse em menor disponibilidade de água (ZILLIANI, 2019), o que ocorreu neste experimento.

4.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

4.2.1 Avaliações biométricas da parte aérea

Na avaliação aos 113 DAB as análises estatísticas foram significativas para DC e NF e na avaliação aos 125 DAB para DC, NF e MSP, conforme demonstra o resumo da ANOVA na TABELA 5. Para o fator de variação irrigação todas as características morfológicas mensuradas mostraram significância a 5% de probabilidade na avaliação aos 125 DAB, exceto MSP. Aleman & Souza (2015) também não apresentaram diferenças estatísticas para MSP da parte aérea e de raiz avaliando a variedade RB867515 em crescimento inicial sob diferentes lâminas de irrigação.

TABELA 5 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS ALTURA DE PLANTAS (AP), DIÂMETRO DE COLMO (DC), NÚMERO DE FOLHAS (NF) E MASSA SECA DE PLANTAS (MSP) ANALISADAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO, AOS 115 E AOS 125 DIAS APÓS BROTAÇÃO.

FV	GL	Quadrados Médios						
		113 DAB			125 DAB			
		AP (cm)	DC (mm)	NF	AP (cm)	DC (mm)	NF	MSP (g)
Variedade (V)	3	15,36 ^{ns}	6,52 *	0,023 *	11,72 ^{ns}	5,82 *	0,162 *	3,994 *
Irrigação (I)	1	24,14 ^{ns}	0,47 ^{ns}	0,001 ^{ns}	119,4 *	16,36 *	0,529 *	0,405 ^{ns}
V × I	3	3,35 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,003 ^{ns}	4,21 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,040 ^{ns}	0,135 ^{ns}
Resíduo	56	8,38	1,18	0,022	8,48	1,15	0,038	0,457
Média		14,93	6,10	4,7	16,10	6,97	4,8	2,095
CV (%)		19,40	17,84	6,50	18,08	15,35	8,55	2,30

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: * significativo e ^{ns} não significativo, ambos a 5% de probabilidade de erro. FV: Fator de variação; GL: Graus de liberdade.

Na interação entre os fatores de variação V × I nenhuma das características morfológicas, para os dois dias de avaliação, foram significativas a 5% de probabilidade, diferente dos dados obtidos por Maia Júnior (2017) em que AP, DC, NF e MSP foram significativos a 5% de probabilidade, ao avaliar variedades de cana-de-açúcar em segundo ciclo de cultivo, submetidas à estresses moderados e severos, em que apresentaram médias inferiores para essas características morfológicas quando comparadas com as médias obtidas para o tratamento com irrigação.

A comparação de médias entre as características morfológicas significativas obtidas neste experimento estão apresentadas na TABELA 6.

TABELA 6 – ALTURA DE PLANTAS (AP), DIÂMETRO DE COLMO (DC), NÚMERO DE FOLHAS (NF) E MASSA SECA DE PLANTAS (MSP) AVALIADAS AOS 113 E 125 DIAS APÓS A BROTAÇÃO DE MINITOLETES DE DIFERENTES VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO.

Variedade	113 DAB			125 DAB			
	AP (cm)	DC (mm)	NF	AP (cm)	DC (mm)	NF	MSP (g)
RB036088	14,375 a	6,29 a	4,8 b	15,618 a	7,28 a	5,0 ab	1,945 ab
RB867515	15,568 a	6,13 ab	4,7 bc	16,925 a	7,03 ab	4,3 b	2,495 a
RB966928	15,855 a	6,71 a	5,5 a	16,682 a	7,45 a	5,8 a	2,455 a
RB036152	13,773 a	5,18 b	3,8 c	15,106 a	6,07 b	5,5 ab	1,419 b

Irrigação	113 DAB			125 DAB			
	AP (cm)	DC (mm)	NF	AP (cm)	DC (mm)	NF	MSP (g)
COM	15,571 a	6,209 a	4,9 a	17,496 a	7,503 a	5,3 a	2,190 a
SEM	14,279 a	5,990 a	4,5 a	14,718 b	6,450 b	4,1 b	1,999 a

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente de acordo com o teste Tukey para variedade e de acordo com o teste F para irrigação, ambos a 5% de probabilidade.

Para DC a variedade RB036152 apresentou média inferior nos dois dias de avaliação, porém, não diferindo estatisticamente da variedade RB867515. De acordo com Oliveira, Braga & Walker (2014), por ser uma característica morfológica intrínseca relacionada diretamente ao fator genético, o DC é não conveniente para confrontar o impacto por DH em plantas de cana-de-açúcar, o que não corrobora com este estudo, já que aos 125 DAB o tratamento com irrigação apresenta média estatisticamente maior para DC do que para o tratamento sem irrigação.

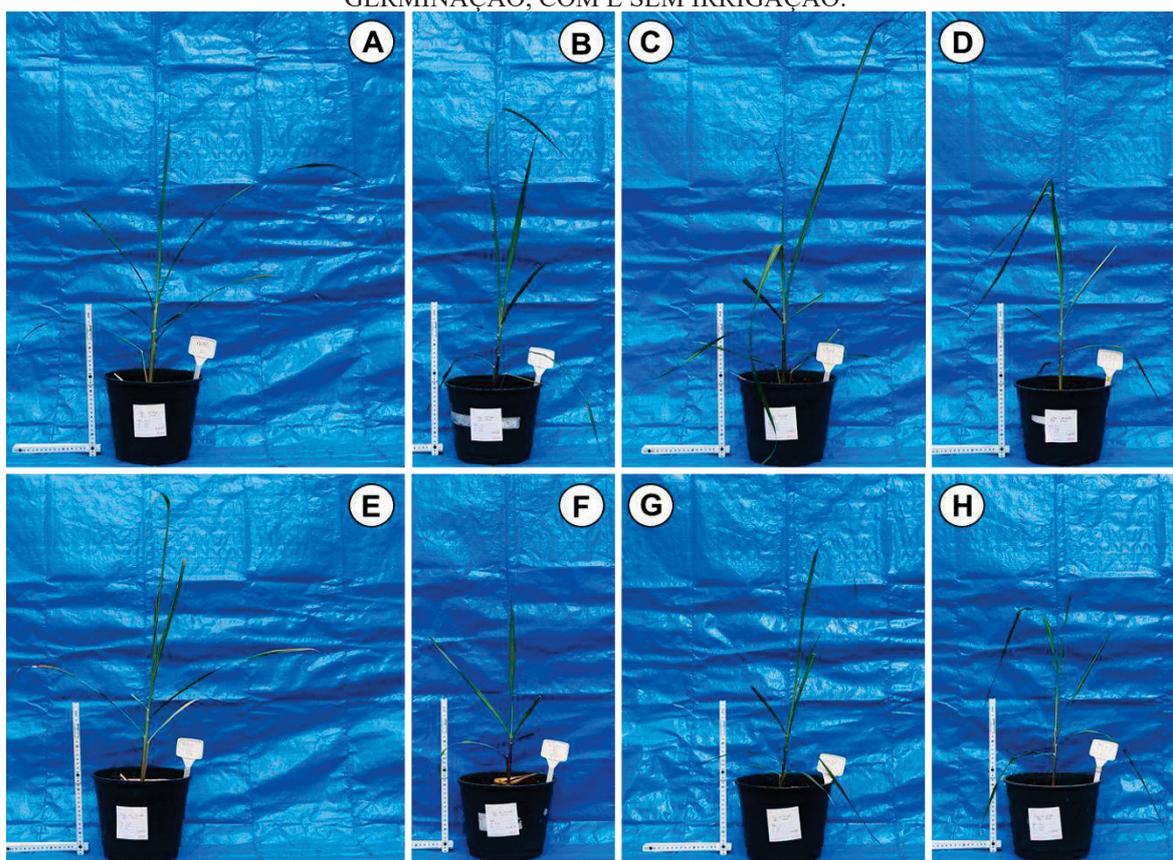
Os processos fisiológicos de $F(A)$ e E estão diretamente correlacionados ao NF, e a redução destas como estratégia de adaptação às adversidades abióticas como a falta de água, interfere na produção total de energia pela planta, mesmo quando há a manutenção de $F(A)$ nas análises fisiológicas (SANTOS et al., 2013; SILVA et al., 2015b). Essa redução de NF não ocorreu para a variedade RB966928, que se destaca na avaliação aos 113 DAB em NF com média de 5,5 e permaneceu com a maior média de NF aos 125 DAB com 5,8 folhas, diferindo somente da variedade RB867515 com 4,3 folhas.

Para Gimenez et al. (2013) ao avaliar características biométricas em cana-de-açúcar sob DH, a variedade RB867515, da mesma forma que neste experimento obteve média de NF inferior, de 9,9 folhas aos 175 DAB de mini toletes. Este resultado somado à manutenção das características fisiológicas de g_s e de E , sustenta a aptidão de tolerância desta variedade para DH. Essa afirmação corrobora ao fato de que esta variedade se destacar nos programas de melhoramento genético para seleção de cana-de-açúcar tolerantes ao DH (HÄRTER, 2018).

Ao analisar as respostas de características fisiológicas relacionadas ao estresse hídrico em variedades de cana-de-açúcar em crescimento inicial, Khonghintaisong et al. (2018) também apontam g_s como importante variável de contribuição de acúmulo de MSP, o que se confirma com os resultados das variedades RB036152 e RB036088 ao apresentarem as menores médias de MSP, com 1,419 e 1,945 g respectivamente, com a instabilidade da atividade de g_s e E citado anteriormente para essas variedades RB (FIGURA 5gs).

Em relação aos tratamentos de irrigação, o tratamento sem irrigação na avaliação aos 125 DAB resultou em médias de AP, DC e NF estatisticamente menores das obtidas no tratamento com irrigação, qualitativamente observadas na FIGURA 6, corroborando com o obtido para Simões et al. (2018) com a diminuição de AP e DC para a variedade IVA 90212 em seu primeiro ciclo conforme mantida em decrescentes lâminas de irrigação.

FIGURA 6 – PLANTAS DE VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR AOS 125 DIAS APÓS A GERMINAÇÃO, COM E SEM IRRIGAÇÃO.



FONTE: A autora, 2023.

LEGENDA: Tratamento com irrigação: A) RB036088; B) RB867515; C) RB966928 e D) RB036152; Tratamento sem irrigação: E) RB036088; F) RB867515; G) RB966928 e H) RB036152; Régua indica 35 cm.

Xiao et al. (2022) relatam em seu estudo valores superiores de AP e DC em plantas transgênicas de cana-de-açúcar quando submetidas às condições de DH no campo, resultando num rendimento 40% maior em relação as plantas não transformadas.

Araújo (2016) ao avaliar a variedade RB867515 verificou diferença estatística para AP a partir do oitavo dia após suspensão de regas depois de efetuar irrigação até CC dos vasos, utilizando areia como substrato. A composição do substrato pode ter fornecido maior tempo de disponibilidade de água para as variedades de cana-de-açúcar avaliadas neste experimento, em concordância com o aferido por Sasamori, Edress Júnior & Droste (2016) ao avaliarem substratos alternativos para a aclimatização de plântulas propagadas *in vitro* para a conservação de uma espécie de bromélia, em que o Carolina Soil® apresenta a maior porcentagem de retenção de água.

4.2.2 Avaliações biométricas de raiz

Para as análises estatísticas referente às características morfológicas de raiz, apresentados na TABELA 7, CR e VR apresentaram resultados significativos a 5% de probabilidade para variedade. Somente CR foi significativo estatisticamente para o fator de irrigação.

TABELA 7 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS COMPRIMENTO DE RAIZ (CR), VOLUME DE RAIZ (VR) ANALISADAS EM CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A PERÍODO DE DÉFICIT HÍDRICO.

FV	GL	Quadrados Médios	
		CR (cm)	VR (m ³)
Variedade (V)	3	2182123*	8,969*
Irrigação (I)	1	541975*	0,398 ^{ns}
V × I	3	274195 ^{ns}	1,012 ^{ns}
Resíduo	56	131997	1,432
Média		1284,42	2,67
CV (%)		28,29	44,86

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: * significativo e ^{ns} não significativo, ambos a 5% de probabilidade de erro. FV: Fator de variação; GL: Graus de liberdade.

Ao compararmos as médias de CR, as variedades RB867515 e RB966928 demonstram médias que se destacam em relação às variedades RB036088 e RB036152, como apresentado na TABELA 8. Para VR, a variedade RB867515 também se sobressai com média superior as médias das demais variedades avaliadas nesse estudo, não diferindo estatisticamente da variedade RB966928.

Os resultados obtidos para Chanaphai et al. (2023) que também avaliaram CV e VR em genótipos de cana-de-açúcar sob condições de seca, são diferentes dos resultados obtidos neste, em que aos 90 dias após o transplante de mudas pré botadas a partir de mini toletes em rizoboxes apontam a diminuição de 53% e 74,2% para CR e de VR, respectivamente, no tratamento com DH quando comparadas ao desenvolvimento de CR e VR sem estresse.

TABELA 8 – COMPRIMENTO DE RAIZ (CR) E VOLUME DE RAIZ (VR) DE CANA-DE-AÇÚCAR, PARA DIFERENTES VARIEDADES, NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DE IRRIGAÇÃO.

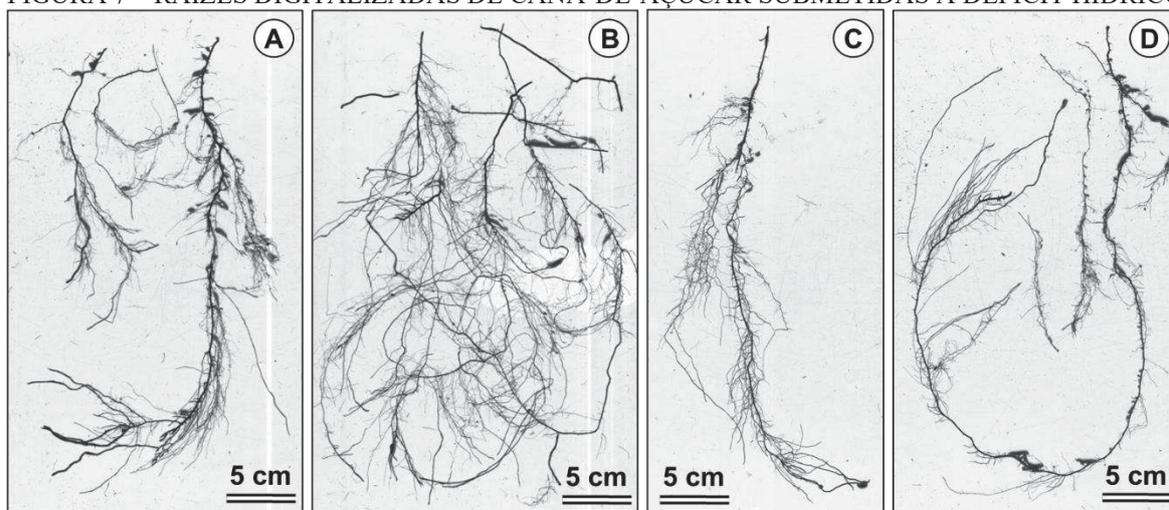
		CR (cm)	VR (m ³)
Variedades	RB036088	1109,13b	2,167bc
	RB867515	1553,38a	3,293a
	RB966928	1602,41a	3,278ab
	RB036152	824,11b	1,839c
Irrigação	COM	1204,65b	2,610a
	SEM	1364,19a	2,723a

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente de acordo com o teste Tukey para variedade e de acordo com o teste F para irrigação, ambos a 5% de probabilidade.

Khonghintaisong et al. (2018) relatam resultado semelhante, em que o estresse hídrico no crescimento inicial de variedades de cana-de-açúcar aumenta o CR, bem como do VR, se apresentando como uma das formas de respostas adaptativas de plantas tolerantes ao DH. Qualitativamente ao observar a FIGURA 7 corroboramos essa afirmação ao visualizarmos as raízes digitalizadas da variedade RB867515 e da RB036152, que apresentaram o maior e o menor CR respectivamente.

FIGURA 7 – RAÍZES DIGITALIZADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO



FONTE: A autora, 2023.

LEGENDA: a) RB867515 sob irrigação em capacidade de campo; b) RB867515 sem irrigação; c) RB036152 sob irrigação em capacidade de campo; d) RB036152 sem irrigação.

Conforme o desempenho de cada variedade avaliada para as condições de DH e o destaque de médias obtidas para CR, as variedades RB867515 e RB966928 demonstram característica de tolerância para crescimento de raiz em comprimento, conforme às condições de estresse por restrição de água aplicadas neste experimento.

Acrescentando essa às características discutidas anteriormente das variedades tolerantes DH, a variedade RB867515 apresenta tolerância ao DH, diferente da variedade RB036152 ao apresentar as médias inferiores de CR e VR juntamente com a instabilidade das atividades g_s e E , resultando no seu menor desempenho sob DH.

5 CONCLUSÃO

O desempenho de variedades de cana-de-açúcar foi afetado na condição de déficit hídrico imposta para as características morfofisiológicas condutância estomática, taxa de transpiração, altura de plantas, diâmetro de colmo e número de folhas, comprimento e volume de raiz.

As variedades RB867515 e RB966928 sob estresse apresentaram maior crescimento de raiz e juntamente com a redução de número de folhas para a RB867515, características de tolerância, diferente das variedades RB036088 e RB036152 que demonstrarem instabilidade da atividade estomática e na taxa de transpiração e menor média de massa seca de plantas.

6 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Maiores tempos de restrição hídrica, preferencialmente em substratos com baixa capacidade de retenção de água, podem explorar com mais precisão o comportamento de $F(A)$ e $CRA\%$ em plantas sob estresse, juntamente com a análise da atividade de antioxidantes e oxidantes, como aferição de prolina e MDA, por exemplo.

Aferições da umidade do substrato/solo, bem como do potencial hídrico da planta, podem relacionar a quantidade de água disponível para as raízes e o comportamento do seu fluxo dentro dos tecidos vegetais e identificar os locais de concentração de solutos.

Considerando as condições de campo em que diferentes distribuições de precipitação é característico, é interessante testes com diferentes quantidades de limitações de água, na qual pode ser considerada a taxa de evapotranspiração da cultura.

O comportamento das plantas no processo de recuperação pós-períodos de estresse hídrico tem se tornado relevante quanto à compreensão dos impactos no crescimento das plantas a longo prazo, em que a “memória ao estresse” da planta desperta os mecanismos de adaptação com mais rapidez e concisão ao passarem por DH novamente.

REFERÊNCIAS

- ABDELSALAM, N. R.; GRAD, W. E.; GHURA, N. S. A. et al. Callus induction and regeneration in sugarcane under drought stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, Egito, v. 28, n.12, p. 7432-7442, dez. 2021. Disponível em: 10.36899/JAPS.2021.1.0203. Acesso em: 20 out. 2021.
- Agricultural Market Information System (AMIS). **Energy and other indicators – Ethanol**, 2022. Disponível em: <https://www.amis-outlook.org/index.php?id=41284>. Acesso em: 19 set. 2023.
- ALEMAN, C. C. & SOUZA, D. Aspectos morfogênicos no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar RB 867515 irrigada. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente - SP, v. 11, n. 2, p.12-18, jul-dez, 2015. Disponível em: 10.5747/ca.2015.v11.n2.a121. Acesso em: 03 out. 2023.
- ALI, A.; CHU, N.; MA, P. et al. Genome-wide analysis of mitogen-activated protein (MAP) kinase gene family expression in response to biotic and abiotic stresses in sugarcane. **Physiologia Plantarum**, Suécia, v. 171, n. 1, p. 86-107, 2021. Disponível em: 10.1111/ppl.13208. Acesso em: 20 out. 2021.
- ARAÚJO, S. H. C. **Mini-toletes de cana-de-açúcar: gemas, biorreguladores, adubação nitrogenada e déficit hídrico**. 2016. 83 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2016. Disponível em: 10.11606/T.11.2016.tde-17062016-095201. Acesso em: 04 out. 2023.
- AUDE, M. I. S. Estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.23, n.2, p. 241-248, ago. 1993. Disponível em: 10.1590/S0103-84781993000200022. Acesso em: 02 dez. 2022.
- BAKKER, H. **Sugar cane cultivation and management**. New York: Springer Science & Business Media, 1999. Disponível em: 10.1007/978-1-4615-4725-9. Acesso em: 21 set. 2023.
- BARBOZA, G. C. **Fluxo de seiva e relação foliar de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)**. 2016. 138 f. Tese (Doutor em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Disponível em: 10.47749/T/UNICAMP.2016.976516. Acesso em: 06 out. 2023.
- BARRS, D. & WEATHERLEY, P.E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Biological Sciences**, Austrália, v. 15, p. 413-428, 1962. Disponível em: 10.1071/BI9620413. Acesso em: 30 out. 2021.
- BEGNA, T. Global role of plant breeding in tackling climate change. **J Agric Sc Food Technol**, Índia, v. 7, n. 2, p. 223-229, jul. 2021. Disponível em: 10.17352/2455-815X.000111. Acesso em: 01 set. 2021.
- BHOSALE, J. & BUREAU, E.T. **India's 2020-21 sugar production till Jan 15 up by 31%, says ISMA**. The Economist Times, e-paper, jan. 2021. Disponível em: <https://economictimes.indiatimes.com/news/economy/agriculture/indias-2020-21-sugar->

production-till-jan-15-up-by-31-says-isma/articleshow/80326931.cms?utm_source=contentofinterest&utm_medium=text&utm_campaign=cppst. Acesso em: 28 out. 2021.

BIANCHI, L.; GERMINO, G. H. & SILVA, M. A. Adaptação das Plantas ao Déficit Hídrico. **Acta Iguazu**. Cascavel, v.5, n.4, p.15-32, 2016. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/16006/10892>. Acesso em: 21 fev. 2023.

BONETT, G. Developmental Stages (Phenology). In: MOORE, P. H. & BOTHA, F. C. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**. Oxford: John Wiley & Sons, 2013. p. 35-53. Disponível em: 10.1002/9781118771280.ch3. Acesso em: 25 fev. 2023.

CHANAPHAI, P.; JONGRUNGKLANG, N.; PUANGBUT, D.; et al. Response of Photosynthetic and Root Traits of Sugarcane Genotypes Under Drought and Recovery Conditions. **Sugar Tech**, Índia, v. 25, p. 1102–1114, 2023. Disponível em: 10.1007/s12355-023-01288-7. Acesso em: 06 out. 2023.

COLLARES, D. **Melhoramento Genético e Biotecnologia na Cana-de-açúcar serão um dos focos do Simpósio**. EMBRAPA, Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/31838262/melhoramento-genetico-e-biotecnologia-na-cana-de-acucar-serao-um-dos-focos-do-simposio>. Acesso em: 25 out. 2021.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: Safra 2018/19**. Brasília, v.5, n.4, abr. 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 02 dez. 2022.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: Safra 2021/22**. Brasília, v.8, n.4, abr. 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 02 dez. 2022.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: Safra 2022/23**. Brasília, v. 10, n. 4, abr. 2023a. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 19 set. 2023.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: Safra 2023/24**. Brasília, v. 11, n. 2, ago. 2023b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 19 set. 2023.

CONTILIANI, D. F.; NEBÓ, J. F. C. D. O.; RIBEIRO, R. V.; et al. Drought-triggered leaf transcriptional responses disclose key molecular pathways underlying leaf water use efficiency in sugarcane (*Saccharum* spp.). **Front. Plant Sci**, Portugal, v. 14, e. 1182461, mai. 2023. Disponível em: 10.3389/fpls.2023.1182461. Acesso em: 26 set. 2023.

CRAMER, G. R.; URANO, K.; DELROT, S.; et al. Effects of abiotic stress on plants: a systems biology perspective. **BMC Plant Biol**, Londres, v. 11, e. 163, nov. 2021. Disponível em: 10.1186/1471-2229-11-163. Acesso em: 01 set. 2021.

DAPANAGE, M. & BHAT, S. Transcriptome profiling through next-generation sequencing in sugarcane under moisture-deficit stress condition. **Sugar Tech**, Índia, v. 22, n. 3,

- p.396-410, mar. 2020. Disponível em: [10.1007/s12355-020-00806-1](https://doi.org/10.1007/s12355-020-00806-1). Acesso em: 20 out. 2021.
- DENG, Q.; DOU, Z.; CHEN, J. et al. Drought tolerance evaluation of intergeneric hybrids of BC3F1 lines of *Saccharum officinarum* × *Erianthus arundinaceus*. **Euphytica**, Holanda, v. 215, n. 12, e. 207, nov. 2019. Disponível em: [10.1007/s10681-019-2513-3](https://doi.org/10.1007/s10681-019-2513-3). Acesso em: 20 out. 2021.
- DHANSU, P.; KULSHRESHTHA, N.; KUMAR, R.; et al. Identification of Drought-Tolerant Co-canes Based on Physiological Traits, Yield Attributes and Drought Tolerance Indices. **Sugar Tech**, Índia, v. 23, n. 4, p. 747-761, mar. 2021. Disponível em: [10.1007/s12355-021-00967-7](https://doi.org/10.1007/s12355-021-00967-7). Acesso em: 20 out. 2021.
- DLAMINI, P. J. Drought stress tolerance mechanisms and breeding effort in sugarcane: A review of progress and constraints in South Africa. **Plant Stress**, v. 2, n. 1, dez. 2021. Disponível em: [10.1016/j.stress.2021.100027](https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100027). Acesso em: 28 ago. 2022.
- EMBRAPA. **Melhoramento genético da cana-de-açúcar**. 1. ed. Aracaju, SE: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2015. 38p. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 26 set. 2019.
- Food and Agriculture Organization (FAO). **Crop yield response to water**. Roma, 2012. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i2800e/i2800e.pdf>. Acesso em: 20 set. 2023.
- FAO. Feeding the world. In autoria: FAO. **FAO estatistical yearbook: word and food agroculture**. Roma, 2013. 123-199 p. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i3107e/i3107e.pdf>. Acesso em: 21 set. 2021.
- Food and Agriculture Organization (FAO). **Agricultural production statistics**. Roma, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb9180en>. Acesso em: 20 set. 2023.
- Food and Agriculture Organization (FAO). Sugar. **Food Outlook – Biannual report on global food markets**. Roma, jun. 2023a. p. 6. Disponível em: [10.4060/cc3020en](https://www.fao.org/3/i3107e/i3107e.pdf). Acesso em: 19 set. 2023.
- Food and Agriculture Organization (FAO). **World Food Situation - FAO Food Price Index**. Set. 2023b. Disponível em: <https://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex/en/>. Acesso em: 20 set. 2023.
- FRANCESCHI, E.; SALDANHA, C. W.; MISSIO, E. L.; et al. Vermicomposto na composição do substrato para produção de mudas de *Schinus terebinthifolius*. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 38, e201801653, p. 1-10, dez. 2018. Disponível em: [10.4336/2018.pfb.38e201801653](https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201801653). Acesso em: 22 fev. 2023.
- GIMENEZ, D. F. J.; DEDEMO, G. C.; VANTINI, J. S.; et al. Análise dos parâmetros biométricos, acúmulo de prolina e identificação de genes envolvidos na resposta ao déficit hídrico em cana-de-açúcar, por cDNA-AFLP. **Científica**, Jaboticabal, v. 41, n. 2, p. 209–

- 225, 2013. Disponível em: 10.15361/1984-5529.2013v41n2p209-225. Acesso em: 06 out. 2023.
- HANDA, S.; HANDA, A. K.; HASEGAWA, P. M. & BRESSAN, R. A. Proline accumulation and the adaptation of cultured plant cells to water stress. **Plant Physiology**, Washington, v. 80, n.4, p. 938-945, abr. 1986. Disponível em: 10.1104/pp.80.4.938. Acesso em: 06 out. 2021.
- HARTATI, R.S.; SUHESTI, S.; WULANDARI, S. et al. In-vitro selection of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) putative mutant for drought stress. In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE, 2021, Indonésia. **The 2nd International Conference on Sustainable Agriculture for Rural Development 2020**. Purwokerto, Indonesia: IOP Publishing, 20 out. 2020, v. 653, e. 012135, Disponível em: 10.1088/1755-1315/653/1/012135. Acesso em: 20 out. 2021.
- HÄRTER, A. **Seleção avançada em cana-de-açúcar para tolerância ao déficit hídrico**. 2018. 84 f. Dissertação (Mestre em Agronomia) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018. Disponível em: <http://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/3972>. Acesso em: 08 ago. 2022.
- HÄRTER, A. **Seleção precoce no melhoramento genético de cana-de-açúcar para tolerância a estresses abióticos**. 2021. 94 f. Tese (Doutor em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2021. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/71589>. Acesso em: 20 out. 2021.
- HERNÁNDEZ-PÉREZ, C. A.; CARLOS GÓMEZ-MERINO, F.; SPINOSO-CASTILLO, J. L. & BELLO-BELLO, J. J. In Vitro Screening of Sugarcane Cultivars (*Saccharum* spp. Hybrids) for Tolerance to Polyethylene Glycol-Induced Water Stress. **Agronomy**, Suíça, v.11, n.3, e. 598, fev. 2021. Disponível em: 10.3390/agronomy11030598. Acesso em: 20 out. 2021.
- HU, X.; WU, Z. DI; LUO, Z. Y.; et al. Genome-wide analysis of the Trehalose-6-phosphate synthase (TPS) Gene family and expression profiling of ScTPS genes in sugarcane. **Agronomy**, Suíça, v. 10, n. 7, n. 969, 2020. Disponível em: 10.3390/agronomy10070969. Acesso em: 30 out. 2021.
- Indian Institute of Sugarcane Research (ICAR). **Sugarcane maps of India and World**. Lucknow, 2019. Disponível em: <https://iisr.icar.gov.in/iisr/pages/maps.jsp>. Acesso em: 02 out. 2023.
- International Sugar Organization (ISO). **ISO Sugar Yearbook 2021**. London, 2021. Disponível em: <https://www.isosugar.org/publication/250/iso-sugar-yearbook-2021>. Acesso em: 24 set. 2021.
- JÚNIOR, S.O.M.; ANDRADE, J.R.; SANTOS, C.M.; et al. Leaf thickness and gas exchange are indicators of drought stress tolerance of sugarcane. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, Emirados Árabes Unidos, v. 31, n. 1, p. 29-38, jan. 2019. Disponível em: 10.9755/ejfa.2019.v31.i1.1897. Acesso em: 20 out. 2021.
- KHONGHINTAISONG, J.; SONGSRI, P.; TOOMSAN, B.; et al. Rooting and Physiological Trait Responses to Early Drought Stress of Sugarcane Cultivars. **Sugar Tech**, Índia, v.

- 20, n. 1, p. 396–406, 2018. Disponível em: 10.1007/s12355-017-0564-0. Acesso em: 06 out. 2023.
- KHUMLA, N.; SAKUANRUNGSIRIKUL, S.; PUNPEE, P. et al. Sugarcane Breeding, Germplasm Development and Supporting Genetics Research in Thailand. **Sugar Tech**, Índia, v. 24, n. 1, fev. 2022. Disponível em: 10.1007/s12355-021-00996-2. Acesso em: 23 out. 2021.
- LI, C.; WANG, Z.; NONG, Q.; et al. Physiological changes and transcriptome profiling in *Saccharum spontaneum* L. leaf under water stress and re-watering conditions. **Scientific Reports**, Londres, v.11, n.1, e. 5525, mar. 2021. Disponível em: 10.1038/s41598-021-85072-1. Acesso em: 20 out. 2021.
- MAHADEVAIAH, C.; HAPASE, P.; SREENIVASA, V.; et al. Delineation of genotype × environment interaction for identification of stable genotypes for tillering phase drought stress tolerance in sugarcane. **Scientific Reports**, Londres, v.11, n.1, e. 18649, mar. 2021. Disponível em: 10.1038/s41598-021-98002-y. Acesso em: 20 out. 2021.
- MAIA JÚNIOR, S. O. **Tolerância de cultivares de cana-de-açúcar ao déficit hídrico: relações hídricas, trocas gasosas, fluorescência da clorofila e metabolismo antioxidante**. 2017. 165 f. Tese (Doutor em agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/3368>. Acesso em: 23 out. 2022.
- MANIMEKALAI, R.; SURESH, G. & SINGARAVELU, B. Sugarcane Transcriptomics in Response to Abiotic and Biotic Stresses: A Review. **Sugar Tech**, Índia, v. 24, n. 4, p. 1295-1318, fev. 2022. Disponível em: 10.1007/s12355-021-01098-9. Acesso em: 08 dez. 2022.
- MARCOS, F. C. C.; SILVEIRA, N. M.; MOKOCHINSKI, J. B.; et al. Drought tolerance of sugarcane is improved by previous exposure to water deficit. **Journal of Plant Physiology**, Londres, v. 223, p. 9-18, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.02.001>. Acesso em: 06 out. 2023.
- MARIN, F. R.; VIANNA, M. S. & NASSIF, D. S. P. Desafios, Restrições e Limitações dos Biocombustíveis de Cana. In: KHAN, M.; KHAN, I. **Biocombustíveis de cana-de-açúcar**. Cham: Springer, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-18597-8_17. Acesso em: 14 out. 2022.
- MAURI, R. **Relações hídricas na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar submetida a déficit hídrico variável**. 2022. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de “Agricultura Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. Disponível em: 10.11606/D.11.2012.tde-14032012-091040. Acesso em: 28 set. 2023.
- MOHANAN, M.V.; PUSHPANATHAN, A.; SASIKUMAR, S.P.T.; et al. Ectopic expression of DJ-1/PfpI domain containing *Erianthus arundinaceus* Glyoxalase III (EaGly III) enhances drought tolerance in sugarcane. **Plant Cell Reports**, Berlin, v. 39, n. 11, p. 1581-1594, 2020. Disponível em: 10.1007/s00299-020-02585-1. Acesso em: 20 out. 2021.

- MOHANRAJ, K.; HEMAPRABHA, G. & VASANTHA, S. Biomass yield, dry matter partitioning and physiology of commercial and *Erianthus* introgressed sugarcane clones under contrasting water regimes. **Agricultural Water Management**, v.255, 107035, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107035>. Acesso em: 20 out. 2021.
- MOLINARI, H.B.C. **Expressão estresse-reduzida do gene P5CS em plantas transgênicas de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico**. 2006. 109 f. Tese (Doutor em Ciências) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/6673>. Acesso em: 18 jul. 2019.
- MOORE, P. H. & BOTHA F. C. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**. Oxford: John Wiley & Sons, 2013. Disponível em: 10.1002/9781118771280. Acesso em: 25 fev. 2023.
- MUÑOZ, C. A. U. & TRUJILLO, F. J. V. Effects of meteorological variables on sugarcane ripening in the Cauca river valley, Colombia. **Pesq. Agropec. Trop.** Goiânia, v. 50, e. 60815, 2020. Disponível em: 10.1590/1983-40632020v5060815. Acesso em: 21 set. 2023.
- MURASHIGE, T & SKOOG, F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue culture. **Physiologia Plantarum**, Suécia, v. 15, p. 473-479, 1962. Disponível em: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x. Acesso em: 05 fev. 2021.
- NARAYAN, J.A.; CHAKRAVARTHI, M.; NERKAR, G. et al. Overexpression of expansin EaEXPA1, a cell wall loosening protein enhances drought tolerance in sugarcane. **Industrial Crops and Products**, v. 159, e. 113035, jan. 2021. Disponível em: 10.1016/j.indcrop.2020.113035. Acesso em: 21 out. 2021.
- OLIVEIRA, A. R.; BRAGA, M. B. & WALKER, A. M. Comportamento vegetativo e qualidade tecnológica de cultivares de cana-de-açúcar submetidas ao estresse hídrico em condições semiáridas do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 06, p. 1187-1195, 2014. Disponível em: 10.26848/rbgf.v8.0.p525-541. Acesso em: 05 out. 2023.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) e Food and Agriculture Organization (FAO). **Sugar. OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032**. Paris, 2023. p. 170-183. Disponível em: 10.1787/08801ab7-en. Acesso em: 19 set. 2023.
- PETER, S.C.; MURUGAN, N.; MOHANAN, M.V.; et al. Isolation, characterization and expression analysis of stress responsive plant nuclear transcriptional factor subunit (NF-YB2) from commercial *Saccharum* hybrid and wild relative *Erianthus arundinaceus*. **3 Biotech**, Berlin, v. 10, n. 7, p. 304, 2020. Disponível em: 10.1007/s13205-020-02295-1. Acesso em: 3 out. 2021.
- PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Rio de Janeiro: Seropédica, 2004. Disponível em: http://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo_thumb/mini/A-Rela--o-da-Planta-com-a-Agua-by-Carlos-Pimentel--2004-.pdf. Acesso em: 22 fev. 2023.

- RAHMAN, M. A.; WU, W.; YAN, Y. & BHUIYAN, A. Overexpression of TERF1 in sugarcane improves tolerance to drought stress. **Crop and Pasture Science**, Austrália, v. 72, n. 4, p. 268-279, fev. 2021. Disponível em: 10.1071/CP20161. Acesso em: 20 out. 2021.
- RAM, B.; HEMAPRABHA, G.; SINGH, B.D. et al. History and Current Status of Sugarcane Breeding, Germplasm Development and Molecular Biology in India. **Sugar Tech**, Nem Delhi, Índia, v. 24, n. 1, jun. 2021. Disponível em: 10.1007/s12355-021-01015-0. Acesso em: 25 out. 2021.
- Renewable Fuels Association (RFA). **2023 Ethanol Industry Outlook**. Missouri, 2023. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/library/rfa-publications>. Acesso em: 19 set. 2023.
- RODOLFO JÚNIOR, F.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; RAMOS, M. L. G.; et al. Respostas fisiológicas em variedades de cana soca submetidas ao déficit hídrico. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 806-816, out/dez. 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/156943/1/Walter-respostas-fisiologicas.pdf>. Acesso em: 06 out. 2023.
- RODRIGUES, G. S. S. C. & ROSS, J. L. S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil** [recurso eletrônico]: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. Uberlândia: EDUFU, 2020. Disponível em: 10.14393/EDUFU/978-65-86084-00-9. Acesso em: 13 fev 2022.
- RUDOLPH, A. S.; CROWE, J.H.; CROWE, L.M. Effects of three stabilizing agents - proline, betaine and trehalose - on membrane phospholipids. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, New York, v. 245, n. 1, p. 134-143, fev. 1986. Disponível em: 10.1016/0003-9861(86)90197-9. Acesso em: 01 set. 2023.
- SACHDEV, S.; ANSARI, S. A.; ANSARI, M. I.; et al. Abiotic Stress and Reactive Oxygen Species: Generation, Signaling, and Defense Mechanisms. **Antioxidants**, Suíça, v. 10, n. 2, e. 277, fev. 2021. Disponível em: 10.3390/antiox10020277. Acesso em: 25 set. 2023.
- SANTOS, R. F. & CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998. Disponível em: 10.1590/1807-1929/agriambi.v2n3p287-294. Acesso em: 21 set. 2023.
- SANTOS, H. R. B.; PEDROSA, E. M. R.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; et al. Crescimento de três variedades de cana-de-açúcar submetidas a estresse hídrico associado à *Meloidogyne incógnita*. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, PE, v. 8, n. 4, p. 547-554, 2013. Disponível em: 10.5039/agraria.v8i4a2618. Acesso em: 04 out. 2023.
- SASAMORI, M. H.; EDRES JÚNIOR, D. & DROSTE, A. Substratos alternativos para a aclimatização de plântulas propagadas in vitro para a conservação de *vriesea incurvata* Gaudich. (Bromeliaceae). **Pesquisas, Botânica**, São Leopoldo, v. 69, p. 293-305, 2016. Disponível em: <https://www.anchietano.unisinos.br/publicacoes/botanica/volumes/069/016.pdf>. Acesso em: 05 out. 2023.
- SELVI, A.; DEVI, K.; MANIMEKALAI, R.; et al. Comparative analysis of drought-responsive transcriptomes of sugarcane genotypes with differential tolerance to drought.

- 3 Biotech**, Berlin, v. 10, n. 6, 2020. Disponível em: 10.1007/s13205-020-02226-0. Acesso em: 20 out. 2021.
- SET-TOW, S.; SONGSRI, P. & JONGRUNGKLANG, N. Variations in Root Distribution Patterns and Cane Yield of 16 Elite Sugarcane Clones Grown Under Varied Soil Conditions. **Sugar Tech**, Índia, v. 22, n. 1, p. 1018–1031, 2020. Disponível em: 10.1007/s12355-020-00834-x. Acesso em: 06 out. 2023.
- SHEN, Q.; WANG, T.; WANG, J.; et al. Functional identification of *Saccharum spontaneum* transcription factor SsWRKY1 to improve drought tolerance in sugarcane. **Acta Agronômica Sinica**, Paris, v. 49, n. 10, p. 2654-2664, 2023, Disponível em: 10.1016/j.plaphy.2023.107706. Acesso em: 26 set. 2023.
- SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. L.; et al. Características morfofisiológicas e produtividade de cana-de-açúcar variam de acordo com a cultivar e o regime hídrico. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 160-177, 2015a. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v1n1p160>. Acesso em: 06 out. 2023.
- SILVA, N.F.; CUNHA, F.N.; TEIXEIRA, M.B.; et al. Crescimento vegetativo da cana-de-açúcar submetida a lâminas de irrigação e fertirrigação nitrogenada via gotejamento subsuperficial. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 2, p. 79-90, abr. 2015b. Disponível em: 10.7127/RBAI.V9N200274. Acesso em: 04 out. 2023.
- SILVA, M.A.; JIFON, J.; SILVA, J.A.G. et al. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Plant Physiology**, New Delhi, v.19, p. 193–201, 2007. Disponível em: 10.1590/S1677-04202007000300003. Acesso em: 30 out. 2021.
- SILVA, J.P.N. & SILVA, M.R.N. **Noções da cana-de-açúcar**. Inhumas: IFG- Instituto Federal de Educação e Tecnologia de Goiás; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 105 p. Disponível em: http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifgo/tecnico_acucar_alcool/nocoos_cultura_cana_acucar.pdf. Acesso em: 6 dez. 2022.
- SIMÕES, W. L.; OLIVEIRA, A. R.; SILVA, J. S.; et al. Trocas gasosas em variedades de cana-de-açúcar submetidas a déficit hídrico no submédio São Francisco. In.: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 5, 2019, Fortaleza; **Anais. I SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE SALINIDADE**, 1, 2019. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará – UFC, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1115453/trocas-gasosas-em-variedades-de-cana-de-acucar-submetidas-a-deficit-hidrico-no-submedio-sao-francisco>. Acesso em: 06 out. 2023.
- SWATHIK, P. C.; NAVEENARANI, M.; ASHWIN, J. N.; et al. Genome-Wide Identification, Characterization and Expression Analysis of Plant Nuclear Factor (NF-Y) Gene Family Transcription Factors in *Saccharum* spp. **Genes**, Suíça, v. 14, n. 6, e. 1147, abr. 2023. Disponível em: 10.3390/genes14061147. Acesso em: 26 set. 2023.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M. & MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

- TEIXEIRA, G.C.M. **Fertirrigação e pulverização foliar com silício em cana-de-açúcar e em cana-energia cultivada sob déficit hídrico**. 2021. 145 f. Tese (Doutora em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/214839>. Acesso em: 08 dez. 2022.
- THOMAS, A.L. **Desenvolvimento da planta de cana-de-açúcar**. 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/147567/000998097.pdf?sequence=1>. Acesso em 08 dez. 2022.
- TRUJILLO-MONTENEGRO, J.H.; RODRÍGUEZ CUBILLOS, M.J.; LOAIZA, C.D.; et al. Unraveling the Genome of a High Yielding Colombian Sugarcane Hybrid. **Frontiers in Plant Science**, Espanha, v. 12, 2021. Disponível em: 10.3389/fpls.2021.694859. Acesso em: 20 out. 2021.
- United States Department of Agriculture (USDA). **Sugar: World Markets and Trade**. Washington, may. 2023. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/sugar.pdf>. Acesso em: 19 set. 2023.
- VALARMATHI, R.; SWAMY, H. K. M.; PREETI, K. & APPUNU, C. Comparative profiling of drought induced root metabolic responses in sugarcane wild relative *Erianthus arundinaceus* (IND 04-1335) and a commercial variety Co 99004. **Journal of Environmental Biology**, Índia v. 42, n. 3, p. 668–677, mai. 2021. Disponível em: 10.22438/jeb/42/3/MRN-1507. Acesso em: 20 out. 2021.
- WEATHERLEY, P.E. Studies in the water relation of cotton plants. The field measurement of water deficit in leaves. **New Phytology**, Londres, v. 49, p. 81–87, mar. 1950. Disponível em: 10.1111/j.1469-8137.1950.tb05146.x. Acesso em: 20 set. 2023.
- WELBAUM, G. E. Water Relations and Cell Expansion of Storage Tissue. In: MOORE, P. H. & BOTHA F. C. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**. Oxford: John Wiley & Sons, 2013. Disponível em: 10.1002/9781118771280. Acesso em: 25 fev. 2023.
- WIROJSIRASAK, W.; SONGSRI, P.; JONGRUNGLANG, N.; TANGPHATSORNRUANG, S.; KLOMSA-ARD, P.; UKOSKIT, K. A Large-Scale Candidate-Gene Association Mapping for Drought Tolerance and Agronomic Traits in Sugarcane. **International Journal of Molecular Sciences**, Califórnia, v. 24, n. 16, e. 120801, ago. 2023. Disponível em: 10.3390/ijms241612801. Acesso em: 26 set. 2023.
- XIAO, S.; WU, Y.; XU, S; et al. Field evaluation of TaDREB2B-ectopic expression sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) for drought tolerance. **Front. Plant Sci.**, Suíça, v. 13, nov. 2022. Disponível em: 10.3389/fpls.2022.963377. Acesso em: 26 set. 2023.
- YUAN, Y.; YANG, X.; FENG, M.; et al. Genome-wide analysis of R2R3-MYB transcription factors family in the autopolyploid *Saccharum spontaneum*: an exploration of dominance expression and stress response. **BMC Genomics**, Amsterdã, v. 22, n. 1, 2021. Disponível em: 10.1186/s12864-021-07689-w. Acesso em: 20 out. 2021.

ZHU, K.; HUANG, C.; PHAN, T.-T.; et al. Overexpression of SoACLA-1 gene confers drought tolerance improvement in sugarcane. **Plant Molecular Biology Reporter**, Nova Iorque, v. 39, n.3, p. 489-500, jan. 2021. Disponível em: 10.1007/s11105-020-01263-6. Acesso em: 20 out. 2021.

ZILLIANI, R. R. **Análise fisiológica de variantes somaclonais e da memória transgeracional em plantas de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica.** 2019. 96 f. Tese (Doutor em Agronomia) – Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, SP, 2019. Disponível em: <http://bdtd.unoeste.br:8080/tede/handle/jspui/1183#preview-link0>. Acesso em: 19 nov. 2022.