



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



**Mirandy dos Santos Dias**

**SUPLEMENTAÇÃO DE PIRUVATO EM GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR  
SOB DÉFICIT HÍDRICO NO SEGUNDO CICLO DE CULTIVO**

Campina Grande, PB

2024

**MIRANDY DOS SANTOS DIAS**

Engenheiro Agrônomo

**SUPLEMENTAÇÃO DE PIRUVATO EM GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR  
SOB DÉFICIT HÍDRICO NO SEGUNDO CICLO DE CULTIVO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Irrigação e Drenagem, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

**Orientador:** Prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes

**Orientador:** Dr. Carlos Henrique de Azevedo  
Farias

Campina Grande, PB

2024

D541s

Dias, Mirandy dos Santos.

Suplementação de piruvato em genótipos de cana-de-açúcar sob déficit hídrico no segundo ciclo de cultivo / Mirandy dos Santos Dias. – Campina Grande, 2024.

86 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes, Dr. Carlos Henrique de Azevedo Farias".

Referências.

1. Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) – Cultura. 2. Estresse Hídrico. 3. Biotecnologia. 4. Piruvato de Cálcio. I. Fernandes, Pedro Dantas. II. Farias, Carlos Henrique de Azevedo. III. Título.

CDU 633.61(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

## FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

**MIRANDY DOS SANTOS DIAS**

**SUPLEMENTAÇÃO DE PIRUVATO EM  
GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB  
DÉFICIT HÍDRICO NO SEGUNDO CICLO DE  
CULTIVO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 01/03/2024

Pedro Dantas Fernandes - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFCG

Vera Lucia Antunes de Lima - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG

Maria Sallydelândia Sobral de Farias - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG

Carlos Henrique de Azevedo Farias - Examinador(a) Externo(a) - Proojet Agro

Lígia Sampaio Reis - Examinador(a) Externo(a) - CECA/UFAL

Francisco de Assis da Silva - Examinador(a) Externo(a) - UFCG



Documento assinado eletronicamente por **Francisco de Assis da Silva, Usuário Externo**, em 10/04/2024, às 09:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **PEDRO DANTAS FERNANDES, Usuário Externo**, em 10/04/2024, às 13:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARIA SALLYDELANDIA DE FARIAS ARAUJO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 10/04/2024, às 13:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **VERA LUCIA ANTUNES DE LIMA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 10/04/2024, às 18:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4348242** e o código CRC **1D154D54**.

Referência: Processo nº 23096.008088/2024-77

SEI nº 4348242



Documento assinado digitalmente

**LIGIA SAMPAIO REIS**

Data: 15/04/2024 09:29:50-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Documento assinado digitalmente

**CARLOS HENRIQUE DE AZEVEDO FARIAS**

Data: 19/04/2024 17:43:03-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

*Aos meus queridos pais, Jorge João e Valdeci de Jesus, pela dedicação, incentivo e fonte de inspiração para seguir em frente;*

*Aos meus irmãos, tios, sobrinhos e esposa pelo apoio e incentivo incondicional durante toda a minha vida acadêmica, principalmente, nas etapas mais difíceis do caminho;*

*A minha madrinha Elisângela e aos primos, Maria, Renilda, Ailton e Binho, pelo incentivo e apoio constante, aconselhando-me a nunca desistir de meus objetivos;*

*Aos meus cunhados, Carlos Alexandre e José Pereira, por todo apoio e incentivo constante.*

***Dedico.***

## **AGRADECIMENTOS**

*A Deus, pela vida e por todas as bênçãos concedidas em minha vida.*

*Aos meus pais, Jorge João e Valdeci de Jesus por todo amor, apoio e sacrifícios que fizeram por mim ao longo da minha jornada.*

*Aos meus irmãos, pelo apoio e incentivo incondicional durante toda a minha vida acadêmica, principalmente, nas etapas mais difíceis do caminho.*

*A minha esposa, Mirele Ferreira, por todo cuidado que por mim demonstrou durante esses anos e por estar ao meu lado em todos os momentos, incentivando-me a nunca desistir de meus objetivos e ajudando a alcançá-los.*

*Agradeço de coração, ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes, pela confiança, ensinamentos e por ter me cedido parte de seu tempo e apoio necessário para a realização deste trabalho... Sem sua orientação, apoio, confiança e amizade, nada disso seria possível... Um exemplo de dedicação e empenho ao ensino e à pesquisa que levarei por toda vida. O aprendizado durante esse tempo de convivência foi repleto de crescimento.*

*Ao Dr. Carlos Henrique de Azevedo pela orientação, apoio e parceria para que essa pesquisa fosse realizada. Obrigado por tudo!*

*A Profa. Dra. Ligia Sampaio Reis pela amizade, incentivo e por contribuir com meu crescimento, tanto profissional como pessoal. Me sinto realmente sortudo por ter uma orientadora/amiga que mostra todo o cuidado, compreensão e paciência por seus alunos.*

*Aos amigos Robson Felipe, Cassiano Nogueira, Idelvan José, Maria de Fátima, Andrezza Maia, Vitória Régia, André Alisson e Airton Gonçalves pela ajuda na execução deste projeto, assim como pela amizade construída ao longo da Pós-Graduação. Um agradecimento especial ao Dr. Francisco de Assis, que se tornou mais que um amigo, um irmão que a vida me presenteou, agradeço a amizade construída e ajuda na execução deste projeto.*

*Aos examinadores, Profa. Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima, Profa. Dra. Maria Sallydelândia Sobral de Farias, Dr. Francisco de Assis da Silva e Prof. Lígia Sampaio Reis, pela disponibilidade em contribuir para a melhoria deste trabalho.*

*Aos Professores do Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, por todos os ensinamentos e amizade.*

*Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Usina Japungu por todo o suporte na realização das análises do experimento.*

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes”.*

*(Martin Luther King)*



## LISTA DE TABELAS

Pág.

<b>Tabela 1</b>	Resumo das características dos genótipos de cana-de-açúcar.....	32
<b>Tabela 2</b>	Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento.....	33
<b>Tabela 3</b>	Detalhamento das aplicações dos tratamentos.....	35
<b>Tabela 4</b>	Umidade e potencial matricial de água no solo.....	41
<b>Tabela 5</b>	Teste F para parâmetros de trocas gasosas e fluorescência da clorofila <i>a</i> de cinco genótipos de cana-açúcar submetidos a três estratégias de manejo, aos 211 DAR.....	42
<b>Tabela 6</b>	Autovalores, porcentagem de variância total explicada e coeficientes de correlações ( <i>r</i> ) entre as variáveis originais e os componentes principais, aos 211 DAR.....	51
<b>Tabela 7</b>	Teste F para parâmetros bioquímicos e variáveis de crescimento de cinco genótipos de cana-açúcar submetidos a três estratégias de manejo, aos 211 DAR.....	53
<b>Tabela 8</b>	Autovalores, porcentagem de variância total explicada e coeficientes de correlações ( <i>r</i> ) entre as variáveis originais e os componentes principais, aos 211 DAR.....	61
<b>Tabela 9</b>	Teste F para componentes de produção e produtividade da água de cinco genótipos de cana-açúcar submetidos a três estratégias de manejo, 385 DAR.....	63
<b>Tabela 10</b>	Autovalores, porcentagem de variância total explicada e coeficiente de correlações ( <i>r</i> ) entre as variáveis originais e os componentes principais, aos 385 DAR.....	67
<b>Tabela 11</b>	Teste F para atributos de qualidade agroindustrial de cinco genótipos de cana-açúcar submetidos a três estratégias de manejo, aos 385 DAR.....	69
<b>Tabela 12</b>	Autovalores, porcentagem de variância total explicada e coeficiente de correlações ( <i>r</i> ) entre as variáveis originais e os componentes principais, aos 385 DAR.....	74

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

<b>Figura 1</b>	Colmo da cana-de-açúcar denominado também de rebolo (A) e nó do colmo de cana-de-açúcar (B).....	20
<b>Figura 2</b>	Sistema de numeração de folhas da cana-de-açúcar.....	21
<b>Figura 3</b>	Resumo das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar com duração de cada evento.....	21
<b>Figura 4</b>	Alterações metabólicas em cana-de-açúcar como consequência do fechamento estomático mediado pelo déficit hídrico.....	25
<b>Figura 5</b>	Ciclos de carboxilação das plantas C <sub>4</sub> , em que se enquadra cana-de-açúcar, ocorrendo o primeiro, nas células do mesófilo e o segundo, o ciclo de Calvin, nas células da bainha vascular.....	28
<b>Figura 6</b>	Temperatura e umidade relativa do ar média coletadas na área interna da casa de vegetação durante o período experimental.....	30
<b>Figura 7</b>	Distribuição dos tratamentos na área experimental.....	31
<b>Figura 8</b>	Ilustração da preparação dos lisímetros de drenagem para preenchimento do solo.....	32
<b>Figura 9</b>	Curva de retenção de água do solo, através do software RETC.....	33
<b>Figura 10</b>	Detalhamento da quantidade de macronutrientes (N P K) utilizados no experimento em cada fase fenológica da cultura.....	34
<b>Figura 11</b>	Balanco hídrico de cinco genótipos de cana-de-açúcar em função das estratégias de manejo.....	36
<b>Figura 12</b>	Conteúdo relativo de água - CRA (A), condutância estomática - $g_s$ (B), transpiração - E (C) e concentração interna de CO <sub>2</sub> - C <sub>i</sub> (D) de cana-de-açúcar em função das estratégias de manejo. Taxa de assimilação de CO <sub>2</sub> - A (E) de cana-de-açúcar em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 211 DAR.....	43
<b>Figura 13</b>	Fluorescência inicial - F <sub>o</sub> (A), fluorescência máxima - F <sub>m</sub> (B), fluorescência variável - F <sub>v</sub> (C) e eficiência quântica máxima do PSII - F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub> (D) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 211 DAR.....	46
<b>Figura 14</b>	Fluorescência inicial antes do pulso de saturação - F' (A), fluorescência máxima após adaptação a luz saturante - F <sub>m</sub> ' (B), taxa de transporte de elétrons - ETR (C) e eficiência quântica do PSII - Y (D) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 211 DAR.....	47

<b>Figura 15</b>	Extinção não fotoquímica de Stern-volmer - NPQ (A), extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila - QCN (B), rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada - YNO (C) e regulada - YNPQ (D) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 211 DAR.....	49
<b>Figura 16</b>	Dendrograma da análise de agrupamento (Cluster Analysis) de genótipos de cana-de-açúcar e formação de subgrupos com similaridade dentro do subgrupo e dissimilaridade entre os subgrupos.....	50
<b>Figura 17</b>	Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores estudados (genótipos e estratégias de manejo) (A) e correlação de parâmetros fisiológicos (B) da cana-de-açúcar nos dois componentes principais (CP <sub>1</sub> ) e (CP <sub>2</sub> ) .....	52
<b>Figura 18</b>	Atividade das enzimas superóxido dismutase - SOD (A), ascorbato peroxidase - APX (B) em função das estratégias de manejo. Desdobramento da interação para a atividade da catalase - CAT (C) em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 211 DAR ..	54
<b>Figura 19</b>	Teor de prolina - PROL (A), clorofila <i>a</i> - Chl <i>a</i> (B), clorofila <i>b</i> - Chl <i>b</i> (C) e carotenoides - Car (D) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 211 DAR.....	55
<b>Figura 20</b>	Desdobramento da interação para altura de plantas – AP (A) e número de colmos -NC (B) de cana-de-açúcar em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 211 DAR.....	58
<b>Figura 21</b>	Diâmetro do colmo - DC (A), número de folhas - NF (B) e área foliar - AF (C) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 211 DAR.....	59
<b>Figura 22</b>	Dendrograma da análise de agrupamento (Cluster Analysis) de genótipos de cana-de-açúcar e formação de subgrupos com similaridade dentro do subgrupo e dissimilaridade entre os subgrupos.....	60
<b>Figura 23</b>	Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores estudados (genótipos e estratégias de manejo) (A) e das variáveis bioquímicas e de crescimento da cana-de-açúcar (B) nos dois componentes principais (CP <sub>1</sub> ) e (CP <sub>2</sub> ) .....	62
<b>Figura 24</b>	Altura do colmo - AC (A) de cana-de-açúcar em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 385 DAR. Diâmetro do colmo - DC (B), número de entrenós - NE (C) e comprimento de entrenós - CE (D) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 385 DAR.....	64

<b>Figura 25</b>	Desdobramento da interação para massa de colmos (MC) e produtividade da água (Ya) de cana-de-açúcar em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 385 DAR.....	65
<b>Figura 26</b>	Dendrograma da análise de agrupamento (Cluster Analysis) de genótipos de cana-de-açúcar e formação de subgrupos com similaridade dentro do subgrupo e dissimilaridade entre os subgrupos.....	67
<b>Figura 27</b>	Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores estudados (genótipos e estratégias de manejo) (A) e dos componentes de produção da cana-de-açúcar (B) nos dois componentes principais (CP <sub>1</sub> ) e (CP <sub>2</sub> ) .....	68
<b>Figura 28</b>	Peso do bolo úmido - PBU (A), teor de fibras - Fibras (B), sacarose polarizada - Pol (C), pureza - PZA (D), açúcares redutores na cana - ARC (E) e açúcares totais recuperáveis - ATR (F) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 385 DAR.....	70
<b>Figura 29</b>	Desdobramento da interação para teor de sólidos solúveis - SS (A), teor de sacarose aparente do caldo - Polc (B) e Pol da cana corrigida - PCC (C) de cana-de-açúcar em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 385 DAR.....	72
<b>Figura 30</b>	Dendrograma da análise de agrupamento (Cluster Analysis) de genótipos de cana-de-açúcar e formação de subgrupos com similaridade dentro do subgrupo e dissimilaridade entre os subgrupos.....	73
<b>Figura 31</b>	Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores estudados (genótipos e estratégias de manejo) (A) e dos atributos de qualidade industrial da cana-de-açúcar (B).....	74

## SUMÁRIO

RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	17
3 OBJETIVOS.....	19
3.1 Geral .....	19
3.2 Específicos.....	19
5 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
5.1 Aspectos gerais da cana-de-açúcar .....	20
5.1.1 Importância socioeconômica e ambiental da cana-de-açúcar.....	22
5.2 Manejo da irrigação em cana-de-açúcar .....	23
5.2.1 Déficit hídrico no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar .....	23
5.2.2 Alterações fisiológicas e bioquímicas em cana-de-açúcar sob déficit hídrico .....	24
5.2.3 Efeitos do déficit hídrico na produção e qualidade industrial da cana-de-açúcar .....	27
5.3 Piruvato na fisiologia das plantas .....	28
6 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
6.1 Localização da área experimental.....	30
6.2 Fatores em estudo, tratamentos e delineamento estatístico .....	30
6.3 Obtenção e características dos materiais genéticos utilizados no experimento.....	31
6.4 Instalação e condução do experimento.....	32
6.5 Manejo da adubação .....	34
6.6 Aplicação dos tratamentos.....	34
6.7 Manejo da irrigação .....	35
6.8 Tratos culturais .....	36
6.9 Parâmetros, variáveis, e atributos analisados .....	36
6.9.1 Conteúdo relativo de água .....	36
6.9.2 Parâmetros de trocas gasosas e fluorescência da clorofila <i>a</i> .....	37
6.9.3 Pigmentos fotossintéticos .....	38
6.9.4 Análises bioquímicas.....	38
6.9.6 Variáveis de crescimento.....	39
6.9.7 Componentes de produção e produtividade da água .....	40
6.9.8 Atributos tecnológicos da cana-de-açúcar.....	40
7 Análise estatística .....	40
8 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	41
8.1 Umidade e potencial matricial de água no solo.....	41

8.2 Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a, aos 211 DAR .....	41
8.3 Parâmetros bioquímicos e variáveis de crescimento, aos 211 DAR .....	53
8.4 Componentes de produção e produtividade da água, aos 385 DAR .....	62
8.5 Qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar, aos 385 DAR.....	68
9 CONCLUSÕES .....	77
LITERATURA CITADA .....	78

## RESUMO

A cana-de-açúcar é uma das maiores commodities agrícolas, ao se considerar as divisas e empregos gerados, em nível mundial. A produção no Nordeste brasileiro, em geral, é baixa, decorrente de diversos fatores, entre eles, a irregularidade de distribuição das chuvas, o que realça a importância de estudos com vistas a minimizar os efeitos déficit hídrico em seu cultivo. O piruvato, como exemplo, é um dos produtos que podem ser utilizados, pois, no metabolismo vegetal participa dos processos de respiração e produção de moléculas energéticas vitais para o desenvolvimento das plantas. Assim, objetivou-se avaliar os efeitos da suplementação de piruvato sobre a ecofisiologia de cinco genótipos de cana-de-açúcar sob déficit hídrico, segundo ciclo de cultivo. O experimento foi realizado em casa de vegetação, da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Campina Grande, onde foram testados cinco genótipos comerciais de cana-de-açúcar (G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e RB041443) submetidos a três estratégias de manejo (E1 - Irrigação plena durante todo ciclo da cultura, E2 - déficit hídrico e aplicação de piruvato e E3- déficit hídrico). O déficit hídrico ocorreu de forma intercalada nas fases de perfilhamento e alongamento do colmo, correspondendo a 30% do volume de água aplicado nas plantas sob irrigação plena. A concentração de 30 mM de piruvato foi aplicada via foliar. O delineamento foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 5 × 3, resultando em 15 tratamentos, com três repetições, perfazendo 45 unidades experimentais. Foram avaliadas variáveis de crescimento, parâmetros fisiológicos, bioquímicos, componentes de produção e atributos tecnológicos. O déficit hídrico reduziu a condutância estomática (36,0%), transpiração (50,9%), eficiência quântica máxima do PSII (24,3%), clorofila *a* (59,9%), clorofila *b* (61,6%), carotenoides (55,7%), área foliar (29,7%), comprimento de entrenós (34,1%), pureza (3,7%) e açúcares totais recuperáveis (4,9%). A suplementação com piruvato favoreceu as trocas gasosas, atividade das enzimas antioxidantes, pigmentos fotossintéticos e fluorescência da clorofila *a*, sem interação com os genótipos, bem como a altura de planta (RB021754), número de colmo (RB863129), massa de colmo (RB041443), comprimento de colmo e a produtividade da água (RB863129, RB92579, RB962962 e RB041443). Além disso, os atributos tecnológicos também foram beneficiados com aplicação de piruvato, com maior expressão no pol da cana corrigida (RB863129) e teor de sacarose aparente do caldo (RB863129 e RB021754). Devido aos efeitos benéficos do piruvato, recomenda-se testes validação para adoção dessa tecnologia em condições de campo.

**Palavras-chave:** *Saccharum officinarum* L., piruvato de cálcio, estresse hídrico, biotecnologia

Dias, M. dos S. **PYRUVATE SUPPLEMENTATION IN SUGARCANE GENOTYPES UNDER WATER DEFICIT IN THE SECOND CULTIVATION CYCLE**. 2024. 86 f. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering) - Federal University of Campina Grande, Center for Technology and Natural Resources. Campina Grande, PB, 2024.

### ABSTRACT

Sugarcane is one of the world's largest agricultural commodities, in terms of foreign exchange and jobs generated. Production in the Brazilian Northeast is generally low, due to various factors, including the irregular distribution of rainfall, which highlights the importance of studies aimed at minimizing the effects of water deficit on its cultivation. Pyruvate, for example, is one of the products that can be used because, in plant metabolism, it participates in the processes of respiration and the production of energy molecules that are vital for plant development. The aim of this study was to evaluate the effects of pyruvate supplementation on the ecophysiology of five sugarcane genotypes under water deficit in the second crop cycle. The experiment was carried out in a greenhouse at the Agricultural Engineering Academic Unit at the Federal University of Campina Grande, where five commercial sugarcane genotypes were tested (G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 and RB041443) subjected to three management strategies (E1 - full irrigation throughout the crop cycle, E2 - water deficit and application of pyruvate and E3 - water deficit). The water deficit was interspersed during the tillering and stem elongation phases, corresponding to 30% of the volume of water applied to the plants under full irrigation. A concentration of 30 mM pyruvate was applied through foliar application. The design was in randomized blocks, in a 5 × 3 factorial scheme, resulting in 15 treatments, with three replications, making up 45 experimental units. Growth variables, physiological and biochemical parameters, production components and technological attributes were evaluated. Water deficit reduced stomatal conductance (36.0%), transpiration (50.9%), maximum quantum efficiency of PSII (24.3%), chlorophyll a (59.9%), chlorophyll b (61.6%), carotenoids (55.7%), leaf area (29.7%), internode length (34.1%), purity (3.7%) and total recoverable sugars (4.9%). The pyruvate supplementation improved gas exchange, antioxidant enzyme activity, photosynthetic pigments and chlorophyll a fluorescence, with no interaction with the genotypes, as well as plant height (RB021754), number of stalks (RB863129), stalk mass (RB041443), stalk length and water productivity (RB863129, RB92579, RB962962 and RB041443). In addition, the technological attributes also benefited from pyruvate application, with greater expression in the pol of corrected cane (RB863129) and apparent sucrose content of the juice (RB863129 and RB021754). Due to the beneficial effects of pyruvate, validation tests are recommended for the adoption of this technology in field conditions.

**Key words:** *Saccharum officinarum* L., calcium pyruvate, water stress, biotechnology



## 1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das commodities agrícolas mais importantes do mundo, pois, além da produção de açúcar, é considerada uma alternativa para o setor de biocombustíveis e eletricidade, devido ao grande potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos (Elsheery et al., 2020; Verma et al., 2021a). Nesse cenário, a expansão do mercado mundial de açúcar e bicombustíveis tem estimulado o crescimento do setor sucroenergético em todo o país.

No entanto, o grande desafio dos produtores é aumentar a produtividade da cultura em áreas onde as chuvas são irregulares nas fases de maior exigência hídrica (Dlamini et al., 2021). A espécie requer boa distribuição da pluviosidade, com maior sensibilidade ao déficit hídrico no perfilhamento e alongamento do colmo (Hoang et al., 2019).

Nas plantas C4, em que se enquadra a cana-de-açúcar, sob condições de déficit hídrico ocorre redução da atividade das enzimas fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPCase), ribulose bisfosfato carboxilase (RuBisCO), enzima málica (NADP-ME), frutose-1,6-bisfosfatase (FBPase) e piruvato ortofosfato diquinase (PPDK) no mesófilo e nas células da bainha vascular (Dlamini et al., 2021; Du et al., 1998; Sage et al., 2013). Além disso, induz a formação de espécies reativas de oxigênio, ocasionadas pela saída de elétrons para o meio celular, a partir da atividade de transporte de elétrons nos cloroplastos, mitocôndrias e em outras organelas por estar a planta em processo de defesa contra o estresse (Sugiharto, 2018). Como consequências, redução da área foliar, senescência foliar, diminuição no número de perfilhos e formação de internódios menores, consequentemente, redução na produtividade agrícola (Inman-Bamber, 2004; Chaves et al., 2009; Dinh et al., 2020).

Embora os efeitos negativos do estresse hídrico na cana-de-açúcar sejam bem relatados na literatura, com registros de serem afetados parâmetros morfológicos (Maia Júnior et al., 2018), fisiológicos (Marcos et al., 2018; Souza et al., 2020), bioquímicos (Morais et al., 2020) produção e qualidade industrial (Begum et al., 2012; Hemaprabha et al., 2013), também está comprovado que substâncias orgânicas podem mitigar os efeitos deletérios do déficit hídrico em seu cultivo. Segundo Verma et al. (2021b), a aplicação de silício via foliar, além de atenuar os efeitos nocivos do déficit hídrico, melhora o sistema de defesa antioxidante das plantas, ao favorecer a dinâmica estomática e a fotossíntese. Maia Júnior et al. (2020) também verificaram em plantas de cana, que a aplicação foliar de glicina betaína mitiga os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre as trocas gasosas e o aparato fotoquímico do PSII.

No entanto, não há na literatura disponível, registros de trabalhos envolvendo aspectos fisiológicos, sistemas de defesa antioxidante, produção e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, em cujos estudos estejam relatados efeitos da associação entre piruvato e déficit hídrico

em plantas com metabolismo C4. Com piruvato, o primeiro trabalho encontrado na literatura foi realizado na China, em que foram incubadas folhas de *Arabidopsis thaliana* em solução de piruvato (10, 100 e 1000  $\mu\text{M}$ ) por um período de 2,5 h, sendo constatado que o piruvato pode atuar como um regulador do movimento estomático (Shen et al., 2017).

No Brasil, Barbosa et al. (2021) avaliaram o efeito do piruvato, via foliar, em duas cultivares de amendoim (IAC Caiapó e BR1) submetidas à restrição hídrica e constataram que a aplicação de 50 mM de piruvato aliviou os efeitos do déficit hídrico sobre a cultivar IAC Caiapó, genótipo exigente em água, e restaurou as enzimas antioxidantes SOD (45,0%), CAT (129,0%) e APX (60,0%) na cv. BR1 que é tolerante à seca. No trabalho de Silva et al. (2023), sobre os efeitos da aplicação de ácido pirúvico (100  $\mu\text{M}$ ) como atenuante do déficit hídrico em algodoeiros variando a fase fenológica, a aplicação de piruvato mitigou os efeitos do estresse hídrico sobre a produção de capulhos 31,0% na BRS Seridó e 34,0% em CNPA 7MH e FM 966. Em outra pesquisa, Silva et al. (2022), ao avaliarem o efeito do piruvato como mitigador do estresse salino sobre a morfofisiologia do maracujazeiro cv. Redondo Amarelo em fase de mudas, observaram atenuação dos efeitos do estresse salino sobre as trocas gasosas e massa seca das raízes, com aplicação exógena de 50 mM de piruvato de cálcio.

Nesse contexto, devido à importância socioeconômica da cana-de-açúcar nas diversas regiões produtoras do Brasil e aos efeitos causados pelo déficit hídrico, sobretudo, no Nordeste do País, são importantes os estudos com aplicação exógena de substâncias orgânicas. O piruvato é um dos produtos que podem ser utilizados, pois no metabolismo vegetal participa dos processos de respiração e produção de ATP, vitais para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Taiz et al., 2017). Segundo Dias et al. (2023), a aplicação exógena de piruvato pode favorecer os mecanismos energéticos da cana-de-açúcar, que não precisarão ativar os processos envolvidos na glicólise, pois, mais moléculas de piruvato estarão disponíveis, reforçando o substrato energético para a produção de ATP. Com essa suplementação, parte da energia que seria gasta na glicólise para a produção de ácido pirúvico, é em processos de adaptação ao déficit hídrico, o que motivou a hipótese para realização desta pesquisa.

Tais estudos podem esclarecer se a suplementação com piruvato pode aliviar os efeitos do déficit hídrico na cana-de-açúcar, sobretudo, em regiões semiáridas, onde a produção, em geral, é prejudicada por estiagens e secas prolongadas.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Geral**

Avaliar os efeitos da suplementação de piruvato sobre a ecofisiologia de cinco genótipos de cana-de-açúcar sob déficit hídrico, no segundo ciclo de cultivo.

#### **3.2 Específicos**

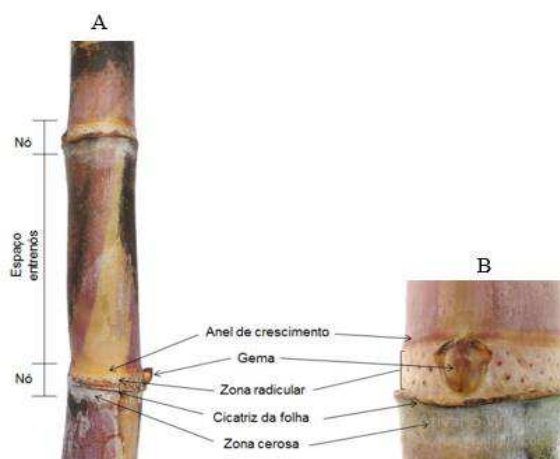
- Analisar as alterações morfológicas de cinco genótipos de cana-de-açúcar em função do déficit hídrico e da suplementação de piruvato, via foliar, na fase de perfilhamento e alongamento do colmo.
- Avaliar os efeitos da suplementação de piruvato, via foliar, em cinco genótipos de cana-de-açúcar sob estresse hídrico no segundo ciclo de cultivo, visando a otimizar parâmetros fisiológicos das plantas.
- Determinar níveis de atividade de enzimas do complexo oxidativo (SOD, CAT e APX) e teor de prolina livre em cinco genótipos de cana-de-açúcar submetidos ao déficit hídrico e suplementação de piruvato, via foliar, na fase de perfilhamento e alongamento do colmo.
- Avaliar o efeito da suplementação de piruvato na produção e qualidade tecnológica de cinco genótipos de cana-de-açúcar cultivados sob déficit hídrico nas fases de perfilhamento e alongamento do colmo.

## 5 REFERENCIAL TEÓRICO

### 5.1 Aspectos gerais da cana-de-açúcar

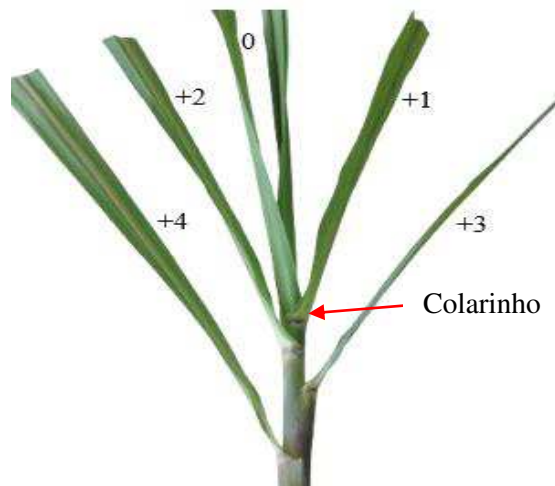
Pertencente à família Poaceae e introduzida no Brasil por volta de 1500, o gênero *Saccharum* tem origem na Papua Nova Guiné (Matos et al., 2020). É composto pelas espécies *S. officinarum*; *S. barberi*; *S. robustum*; *S. spontaneum*; *S. sinensis*; *S. edule*, com destaque para *S. officinarum* L. e *S. spontaneum* L., das quais derivam a maioria das variedades de cana-de-açúcar cultivadas e produzidas no mundo (Scarpari; Beauclair, 2008). Tais espécies têm colmos com formato cilíndrico, folhas alternadas e opostas aderidas ao colmo, sistema radicular de arquitetura variável e inflorescência que é indesejável para o cultivo comercial, entretanto, importante para o melhoramento genético (Figueiredo, 2010).

A cana-de-açúcar é perene na sua forma natural, mas semi-perene quando cultivada comercialmente, com replantio, geralmente, entre a quinta e a sétima colheita. Além disso, a propagação é predominantemente assexuada, mediante colmos denominados de rebolos que são órgãos de reservas compostos por nós e entrenós (Figura 1).



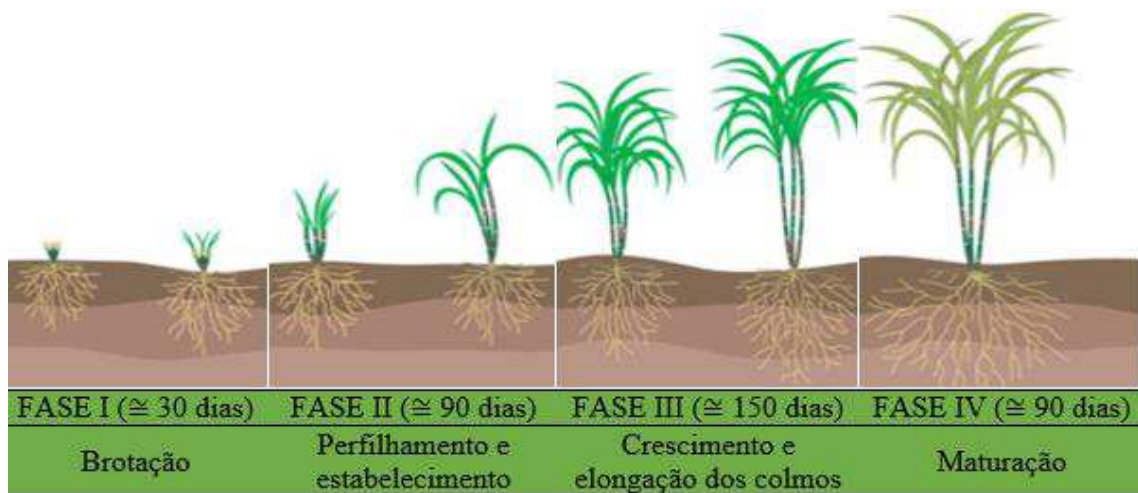
**Figura 1.** Colmo da cana-de-açúcar denominado também de rebolo (A) e nó do colmo de cana-de-açúcar (B). (Extraído de Thomas, 2016).

As folhas são enumeradas de cima para baixo (Figura 2), em que consiste designar como +1 a primeira folha de cima para baixo, que se apresenta inserida com a aurícula (colarinho) bem visível, sucessivamente (Kuijper, 1915).



**Figura 2.** Sistema de numeração de folhas da cana-de-açúcar. (Adaptado de Kuijper, 1915).

Fisiologicamente é uma planta com metabolismo C4 com quatro fases de desenvolvimento (Figura 3), são elas: brotação, perfilhamento, período de crescimento e alongamento dos colmos, maturação e, em alguns casos, florescimento (Dinardo-Miranda et al., 2010; Verma et al., 2021b).



**Figura 3.** Resumo das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar com duração de cada evento. (Adaptado de Marin et al., 2009).

As fases fenológicas em cana-soca são idênticas as fases de cana-planta, porém, da brotação até o fechamento do dossel é mais rápida, porque existe um sistema radicular estabelecido (Thomas et al., 2016). A fase de brotação (Figura 3) em cana-planta, começa de 7 a 10 dias e duração de 3 a 5 semanas após o plantio, dependendo de diversos fatores, entre eles, estado nutricional e posição da gema, bem como das cultivares e fatores climáticos (Aude, 1993; Marin et al., 2009). No caso de rebrota, após efetuar a colheita dos colmos, se inicia a brotação da soqueira, e um novo processo de perfilhamento é estabelecido (Silva et al., 2008).

A fase de perfilhamento (Figura 3), dá-se aproximadamente 40 dias após o plantio (DAP), perdurando até os 120 DAP (Marin et al., 2009; Diola; Santos, 2010). Segundo Jadoski et al. (2010), essa fase exerce grande importância para o produtor, pois, vai determinar a quantidade de perfilhos por hectare, que juntamente com o início da acumulação de sacarose nos tecidos do colmo, determinarão a produtividade agrícola.

A partir dos 120 DAP até os 270 DAP, ocorre a fase de crescimento e alongação dos colmos (Diola; Santos, 2010). Que se caracteriza por intensa divisão, diferenciação e alongamento celular, sendo o estágio de desenvolvimento mais importante para a captação da radiação solar pela planta e a conversão em matéria seca total (Aude, 1993).

Ao completar as fases anteriores, o crescimento é paralisado e inicia a fase de maturação, perdurando até os 360 dias aproximadamente, dependendo do manejo adotado. Essa fase representa a principal etapa de desenvolvimento da planta, pois envolve a formação de açúcares nas folhas e armazenamento a partir do deslocamento para o colmo (Watt et al., 2014).

Além disso, o amadurecimento ou acumulação de sacarose é um processo que se realiza entrenó por entrenó, sendo que a maturação do açúcar ocorre de baixo para cima, conseqüentemente, a parte de baixo contém mais açúcares que a parte de cima. Segundo Aude (1993), na época da colheita os colmos industrializáveis devem estar no mínimo com teor de sólidos solúveis de 18 °Brix, percentagem de sacarose aparente no caldo de 15,3% (Pol), pureza mínima de 85% e no máximo 1% de açúcares redutores, como glicose e frutose.

### **5.1.1 Importância socioeconômica e ambiental da cana-de-açúcar**

Durante muito tempo, a cana-de-açúcar era empregada, sobretudo, para produção de açúcar e álcool, no entanto, a partir do reaproveitamento da fitomassa da planta, as unidades de produção têm buscado operar com maior eficiência, o que auxilia na redução dos custos e contribui para sustentabilidade da atividade (Vandenberghe et al., 2022).

Com a expansão da demanda mundial por etanol oriundo de fontes renováveis e a conscientização das pessoas em relação ao meio ambiente sobre os efeitos indesejáveis da utilização de combustíveis fósseis, a cana-de-açúcar se tornou uma importante alternativa para o setor de biocombustíveis pelo seu grande potencial na produção de etanol e aos respectivos subprodutos (Matos et al., 2020; Rabelo et al., 2020). É importante salientar que, do processamento da cana, a vinhaça é usada na fertirrigação, com economia de água e nutrientes pela indústria; a torta de filtro, para recuperação de áreas degradadas e com baixo teor de matéria orgânica; e o melaço na alimentação animal (Santos et al., 2020).

O uso dos resíduos do setor sucroenergético tornou-se mais importante do que apenas uma necessidade de atendimento às exigências ambientais quanto à sua correta destinação (Vandenberghé et al., 2022). Esse setor, inclusive, vem diversificando e incorporando novas tecnologias de produção de novos produtos. Nesse contexto, diversas empresas vêm utilizando a cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de plásticos renováveis, bioetanol, e produtos químicos de alto valor, além de bioetanol primeira geração e segunda geração em escala industrial (Vandenberghé et al., 2022).

Segundo a CONAB (2023), o Brasil desponta como maior produtor mundial, com produção de 578,76 milhões de toneladas em 8,35 milhões de hectares e produtividade média de 69,36 t ha<sup>-1</sup>. A região Sudeste, principal produtora do país, deteve 366,32 milhões de toneladas e produtividade média de 71,05 t ha<sup>-1</sup>. No Nordeste foram colhidas 48,4 milhões de toneladas e produtividade média 58,78 t ha<sup>-1</sup>.

## **5.2 Manejo da irrigação em cana-de-açúcar**

### **5.2.1 Déficit hídrico no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar**

A disponibilidade hídrica adequada é essencial para os processos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos e moleculares das plantas, bem como para a produção agrícola. Segundo Mohanraj et al. (2021), a necessidade hídrica da cana-de-açúcar pode variar entre de 1850 a 2500 mm ano<sup>-1</sup>. Dependendo do clima, da variedade e duração do período total de crescimento da cultura, o consumo hídrico diário varia de 2 a 6 mm (Oliveira et al., 2018).

No cultivo de cana-de-açúcar, normalmente, o estresse hídrico ocorre durante as fases de perfilhamento e alongamento do colmo (Hoang et al., 2019). Nessas fases, a disponibilidade hídrica tem papel fundamental na pressão de turgor das células e na translocação de fotoassimilados nos órgãos da planta. No entanto, sob déficit hídrico, menor será a síntese e acumulação de fotoassimilados, conseqüentemente, o processo de divisão e expansão celular serão prejudicados, com redução no crescimento e desenvolvimento das plantas (Hoang et al., 2019; Dinh et al., 2020).

A redução no crescimento é considerada como uma estratégia adaptativa para a sobrevivência da cultura, pois diminui o gasto metabólico para a manutenção da turgescência dos tecidos e permite direcionar assimilados para manter o crescimento da raiz, visando absorção de água (Inman-Bamber; Smith, 2005).

Em pesquisa desenvolvida por Endres et al. (2018) com seis genótipos de cana-de-açúcar (SP79-1011, RB855113, RB92579, RB867515, RB72454 e RB855536) submetidos ao déficit hídrico em diferentes fases fenológicas da cultura, constataram que na fase de

alongamento do colmo, o déficit hídrico reduziu a altura das plantas em RB855113 e SP791011 (54,0 e 34,8%, respectivamente), a largura foliar em RB72454 (29,2%) e RB92579 (25,1%), e o comprimento da folha em RB855536 (27,0%) e SP791011 (29,7%). Com a inibição da expansão foliar, a planta transpira menos, conservando a água do solo por um período mais longo. Ao diminuir a área foliar, ocorre redução do processo fotossintético.

Os efeitos do déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar são documentados por vários pesquisadores, a exemplo de Maia Júnior et al. (2018), ao avaliarem três condições hídricas (80-100, 40-60 e 0-20% da água disponível no solo), verificaram reduções na altura (38,0%), diâmetro do colmo (13,0%) e área foliar (44,2%) das plantas submetidas ao estresse severo (0-20%). Também em pesquisa conduzida com plantas de cana, Misra et al. (2020) constataram redução na altura (18,2%), diâmetro do colmo (7,3%), número de entrenós (43,5%) e comprimento internodal (39,0%) e massa da raiz (16,9%) sob condições de seca.

Consistente com essas observações, Gomathi et al. (2020) ao estudarem oito clones de cana-de-açúcar (Co12007, Co12008, Co12009, Co12012, Co12019, Co12024, Co86032 e Co99004) sob déficit hídrico, constataram que a altura da planta é significativamente afetada, com reduções de 37,0, 16,0 e 16,0% na fase de perfilhamento, alongamento e maturação, respectivamente. Anos antes, Batista et al. (2015) ao avaliarem os efeitos do déficit hídrico no crescimento de quatro genótipos de cana-de-açúcar (RB92579, RB855453, RB867515 e RB928064) também verificaram que o déficit hídrico reduz 60% a altura do colmo, em comparação as plantas que não foram submetidas ao déficit hídrico.

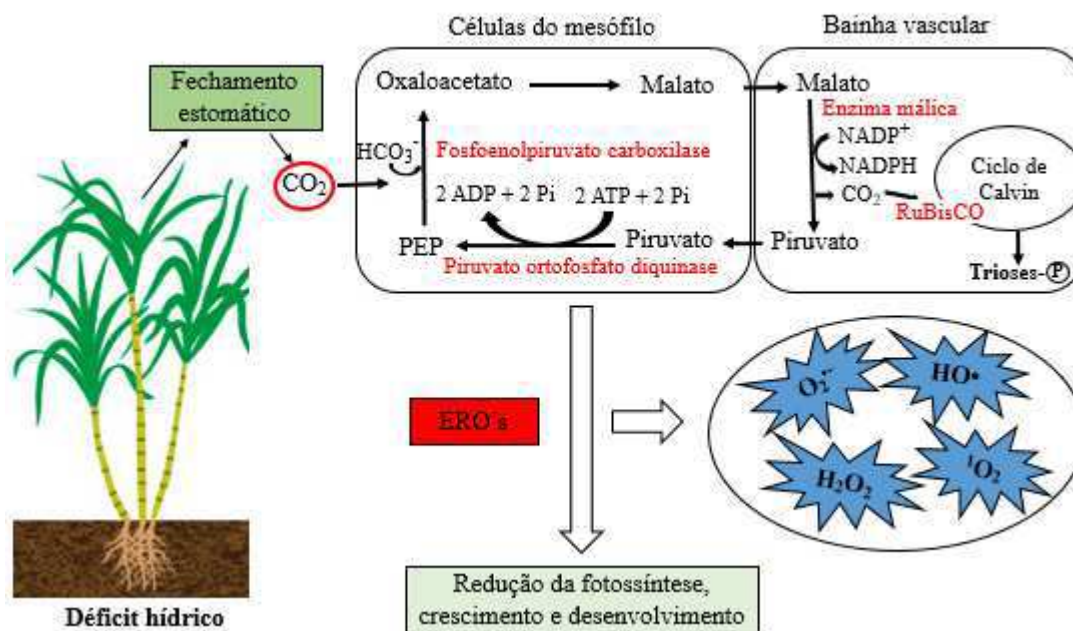
### 5.2.2 Alterações fisiológicas e bioquímicas em cana-de-açúcar sob déficit hídrico

As plantas quando cultivadas em condições de déficit hídrico sofrem alterações em todos os níveis de organização celular. Na fisiologia, por exemplo, o déficit hídrico resulta na biossíntese de ácido abscísico (ABA), que é produzido na coifa das raízes e translocado para a parte aérea, onde é acumulado e redistribuído intracelularmente nas células-guarda (Aquino et al., 2015). Nas células esse hormônio induz o fechamento estomático e a maioria dos processos de trocas gasosas (Mittler; Blumwald, 2015). Ao estudarem a tolerância da cana-de-açúcar à seca, Marcos et al. (2018) identificaram maiores concentrações de ABA nas plantas estressadas e como consequência menor abertura estomática.

Segundo Laxa et al. (2019), o fechamento estomático é uma das primeiras respostas ao déficit hídrico que visa reduzir a perda de água, e como consequência diminui a difusão de CO<sub>2</sub>. Dessa forma, a reação com o fosfoenolpiruvato (PEP) será prejudicada, bem como a reação oxaloacetato à malato que desencadeará em alterações metabólicas, refletindo na fotossíntese e



fitomassa vegetal (Ghannoum, 2009; Sage et al., 2013) (Figura 4). Todavia, em plantas com metabolismo C4, o CO<sub>2</sub> que se concentra ao redor do sítio da RuBisCO é refixado e, assim, a fotorrespiração é reduzida (Taiz et al., 2017).



**Figura 4.** Alterações metabólicas em cana-de-açúcar como consequência do fechamento estomático mediado pelo déficit hídrico. (Adaptado de Fernandes et al., 2016).

Devido à diminuição da capacidade fotossintética sob condições de déficit hídrico, uma baixa intensidade de luz é usada na fotossíntese, por isso, uma menor proporção da energia incidente é utilizada para produzir ATP e NADPH, resultando em fotoinibição (Martinazzo et al., 2013; Sales et al., 2013). Segundo Silva et al. (2014), a intensidade da fotoinibição pode ser medida pela redução da eficiência quântica máxima do PSII (Fv/Fm). Em condições normais, Fv/Fm pode variar entre 0,75 e 0,85, enquanto uma queda nesta razão reflete em dano fotoinibitório nos centros de reação do PSII (Bolhàr-Nordenkamp et al., 1989).

Inúmeros trabalhos reportam efeitos prejudiciais da seca às trocas gasosas e a eficiência quântica máxima do PSII (Fv/Fm) em cana-de-açúcar, como no estudo de Leanasawat et al. (2021) sobre respostas fisiológicas e agrônômicas em genótipos de cana-de-açúcar sob condições de seca, o déficit hídrico reduziu as trocas gasosas e a eficiência quântica máxima do PSII. No mesmo ano, Verma et al. (2021b) verificaram em plantas de cana que, o déficit hídrico restringe o conteúdo relativo de água, síntese de pigmentos fotossintéticos e a eficiência quântica máxima do PSII.

No mesmo campo dessas observações, Silva et al. (2013), ao avaliarem respostas fisiológicas de três genótipos sob duas condições hídricas (deficiência hídrica e reidratação),

constatarem reduções na Fv/Fm, teor relativo de água, potencial hídrico da folha e nos teores de pigmentos fotossintéticos. Além desses estudos, Souza et al. (2020) verificaram reduções nos níveis de emissão de fluorescência e teores de pigmentos fotossintéticos em RB855536 e RB93509 submetidas à restrição hídrica durante o crescimento inicial.

Tais reduções levam as plantas a serem expostas ao excesso de energia, portanto, formação de espécies reativas de oxigênio (ERO's), como ânion superóxido ( $O_2^{\cdot-}$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), radical hidroxila ( $HO^{\cdot}$ ) e oxigênio singlete ( $^1O_2$ ) (Figura 4), que são prejudiciais para o metabolismo celular (Foyer, 2018; Laxa et al., 2019). Notadamente, as ERO's exercem papéis divergentes nas plantas, pois, em baixos níveis, atuam como moléculas sinalizadoras, induzindo uma resposta positiva no sistema antioxidante, no entanto, em níveis elevados, todas as formas de ERO's, tornam-se tóxicas e capazes de interagir com todos os tipos de moléculas orgânicas, promovendo a senescência e a morte celular (Foyer, 2018; Tavanti et al., 2021).

Em resposta ao ambiente oxidativo, causado pelo estresse, as plantas têm um complexo sistema antioxidativo de defesa que limpam espécies radicais e não radicais de oxigênio, composto por componentes enzimáticos e não enzimáticos, como o ascorbato, a glutatona, os carotenoides e outros compostos fenólicos. Por outro lado, o mecanismo enzimático de desintoxicação envolve a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e glutatona redutase (GR) (Hasanuzzaman et al., 2020; Tavanti et al., 2021).

Assim, o equilíbrio entre a formação e a remoção de ERO's é essencial para o bom funcionamento das células vegetais, especialmente, quando expostas a condições adversas (Hasanuzzaman et al., 2020). Estudos conduzidos com cana-de-açúcar sob restrição hídrica, tem-se constatado que as enzimas SOD, CAT e APX são eficientes em eliminar as espécies reativas de oxigênio. Tais resultados foram verificados por Vilela et al. (2017), ao avaliarem dois genótipos de cana-de-açúcar (RB867515 e RB855536) submetidas à condições de seca progressiva (2, 4, 6 e 8 dias), observaram aumento na atividade da SOD, CAT e APX em resposta à seca; e Boaretto et al. (2014), ao investigarem as respostas bioquímicas do sistema enzimático antioxidante de dois genótipos (IACSP94-2094 e IACSP95-5000) verificaram que a atividade da SOD e CAT aumentou 29,6 e 30,0%, respectivamente, sob condições de estresse severo (30,0% AD) em ambos os genótipos.

Além disso, sob estresse hídrico, as plantas também acumulam osmólitos orgânicos no citosol para equilibrar a pressão osmótica no interior das células, e assim, a absorção de água e a pressão de turgor das células. A prolina é um dos mais importantes osmólitos orgânicos que

contribui para o ajustamento osmótico, bem como na eliminação de espécies reativas de oxigênio (Hosseinifard et al., 2022).

Apesar das pesquisas se concentrarem apenas nos efeitos deletérios do déficit hídrico, há comprovação que substâncias provenientes de produtos orgânicos podem minorar os efeitos deletérios da seca às plantas, elevando a capacidade das plantas de se ajustarem a tais condições. Por exemplo, na pesquisa de Verma et al. (2021b) a aplicação de silício, via foliar, além de amenizar os efeitos nocivos do déficit hídrico, melhora o sistema de defesa antioxidante das plantas, ao favorecer a dinâmica estomática e a fotossíntese, assim, a produtividade agrícola. Também em plantas de cana, Maia Júnior et al. (2020) verificaram que a aplicação foliar de glicina betaína mitiga os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre as trocas gasosas e eficiência quântica máxima do PSII.

### 5.2.3 Efeitos do déficit hídrico na produção e qualidade industrial da cana-de-açúcar

O fornecimento adequado de água durante o ciclo da cana-de-açúcar, além de favorecer o crescimento e desenvolvimento, aumenta a produtividade e a quantidade de açúcares totais recuperáveis (ATR) (Farias et al., 2009; Sugiharto, 2018). Por outro lado, a acumulação de sacarose durante o déficit hídrico pode ser limitada, pois ao limitar a fotossíntese e a quantidade de fotoassimilados, as reservas de sacarose armazenadas são metabolizadas para manter o funcionamento das células e, portanto, reduz o número de colmos e formação de internódios menores, e com isso, menor produtividade agrícola (Inman-Bamber, 2004; Chaves et al., 2009; Dinh et al., 2020).

Ao contrário de outras culturas, a produtividade da cana está diretamente relacionada ao número de colmos, comprimento de colmos, número de entrenós, comprimento dos entrenós e diâmetro do colmo (Gomathi, et al., 2014). Inúmeros trabalhos reportam efeitos prejudiciais do déficit hídrico no rendimento da cana-de-açúcar. Misra et al. (2020) observaram que o déficit hídrico reduziu 21,3% a massa dos colmos. Segundo Gomathi et al. (2020), houve redução na massa do colmo (23,5%), rendimento da cana (32,9%) e do açúcar (31,2%). Leanasawat et al. (2021) ao avaliarem as características agrônômicas em genótipos de cana-de-açúcar, constataram redução na produtividade quando submetidos a déficit hídrico.

Em tais condições, há redução na atividade das enzimas do metabolismo de carboidratos e interferência na partição dos fotoassimilados para os diferentes órgãos da planta (Venkataramana et al., 1986). Há diminuição no conteúdo de sacarose, formação dos colmos e nos atributos de qualidade industrial (Begum et al., 2012; Marin et al., 2009). Wiendenfeld (2000) verificaram que seis semanas de estresse hídrico na fase de alongamento do colmo há

redução de 4,7% na quantidade de sacarose e 19,1% o rendimento da cana. Begum et al. (2012) ao avaliarem os efeitos do déficit hídrico sobre a qualidade do caldo de seis genótipos de cana, constataram redução no teor de açúcares redutores (ATR), sólidos solúveis (SS) e porcentagem de sacarose da cana (Polc).

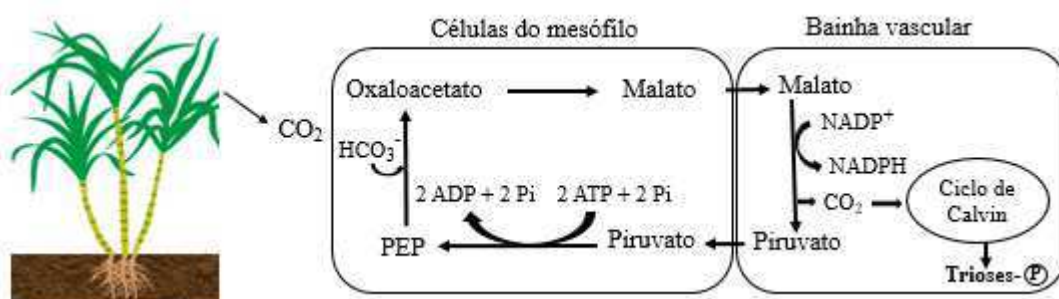
### 5.3 Piruvato na fisiologia das plantas

As plantas com metabolismo C<sub>4</sub>, em que se enquadra a cana-de-açúcar, têm uma alta eficiência de uso da água em comparação com as plantas C<sub>3</sub>, e isso contribui para seu sucesso em ambientes adversos. Além disso, essas plantas têm uma melhor eficiência catalítica da ribulose bisfosfato carboxilase (RuBisCO) (Taiz et al., 2017).

Nas plantas C<sub>4</sub>, o CO<sub>2</sub> é convertido em bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), nas células do mesófilo que reage com o fosfoenolpiruvato (PEP) com o auxílio da PEP carboxilase (PEPcase), resultando em oxaloacetato (OAA), que dependendo da espécie pode ser reduzido a malato (primeiro composto estável) ou aspartato (Schlüter et al., 2020; Taiz et al., 2017).

Após a formação, malato ou aspartato (4C) são exportados para as células da bainha vascular, em que se submetem as reações de descarboxilação (Majerowicz, 2019; Schlüter et al., 2020). Embora essas reações sejam comuns a todas as plantas C<sub>4</sub>, são encontradas variações bioquímicas na fase de descarboxilação (Majerowicz, 2019). Plantas como *Amaranthus sp.* e *Panicum miliacium*, a enzima descarboxiladora está localizada nas mitocôndrias, enquanto nas plantas do gênero *Spartina sp.* e o *Panicum maximum*, a descarboxilação é catalisada pela enzima fosfoenolpiruvato carboxiquinase (Leegood, 1993; Majerowicz, 2019).

Na cana-de-açúcar, conforme Figura 5, o malato é descarboxilado no interior dos cloroplastos das células da bainha vascular através da enzima malato desidrogenase dependente de NADP (NADP-MDHase), resultando em CO<sub>2</sub> e piruvato (Ghannoum, 2009).



**Figura 5.** Ciclos de carboxilação das plantas C<sub>4</sub>, em que se enquadra cana-de-açúcar, ocorrendo o primeiro, nas células do mesófilo e o segundo, o ciclo de Calvin, nas células da bainha vascular. (Adaptado de Majerowicz, 2019).

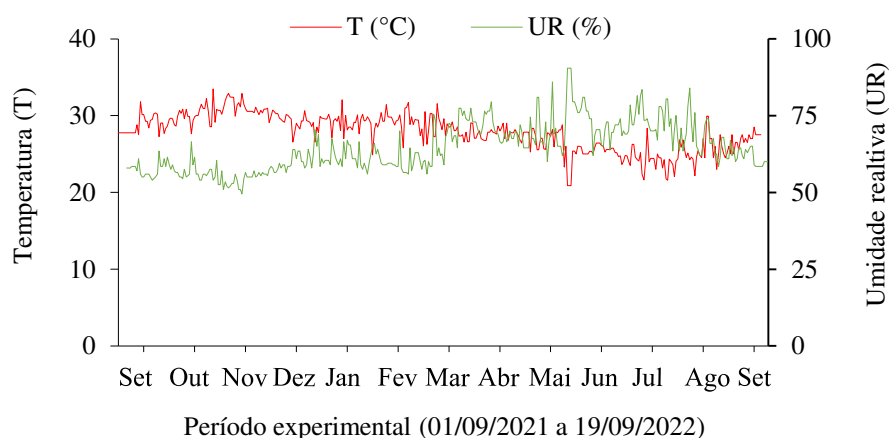
Após a descarboxilação, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é refixado pela RuBisCO que será reduzido a carboidratos no ciclo de Calvin-Benson (Lin et al., 2020). Em seguida, o piruvato (3C) retorna para a célula do mesófilo para transformar-se em fosfoenolpiruvato (PEP), aceptor inicial de  $\text{CO}_2$ , por ação da enzima piruvato ortofosfato diquinase (PPDK), com gasto de energia (ATP) (Cacefo et al., 2019; Schlüter et al., 2020). Segundo Taiz et al. (2017), nessa transformação são gastas duas moléculas de ATP, uma na reação catalisada por piruvato fosfato diquinase e outra na transformação de monofosfato de adenosina (AMP) a difosfato de adenosina (ADP) catalisada por adenilato quinase (AK).

## 6 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.1 Localização da área experimental

O experimento foi desenvolvido no período de setembro de 2021 a setembro de 2022, em casa de vegetação, pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), localizada em Campina Grande, PB, com coordenadas 7° 15' 18'' S e 35° 52' 28'' W e altitude de 550 m. Segundo a classificação climática Köppen, o clima da região tem temperaturas mais moderadas, considerado tropical com estação seca do tipo As, estação chuvosa que se inicia em maio, com término em setembro, podendo se estender até outubro (Azevedo et al., 2015). A temperatura média anual da região é de 28°C, precipitação pluviométrica de 802,7 mm ano<sup>-1</sup> e umidade relativa do ar de 83%.

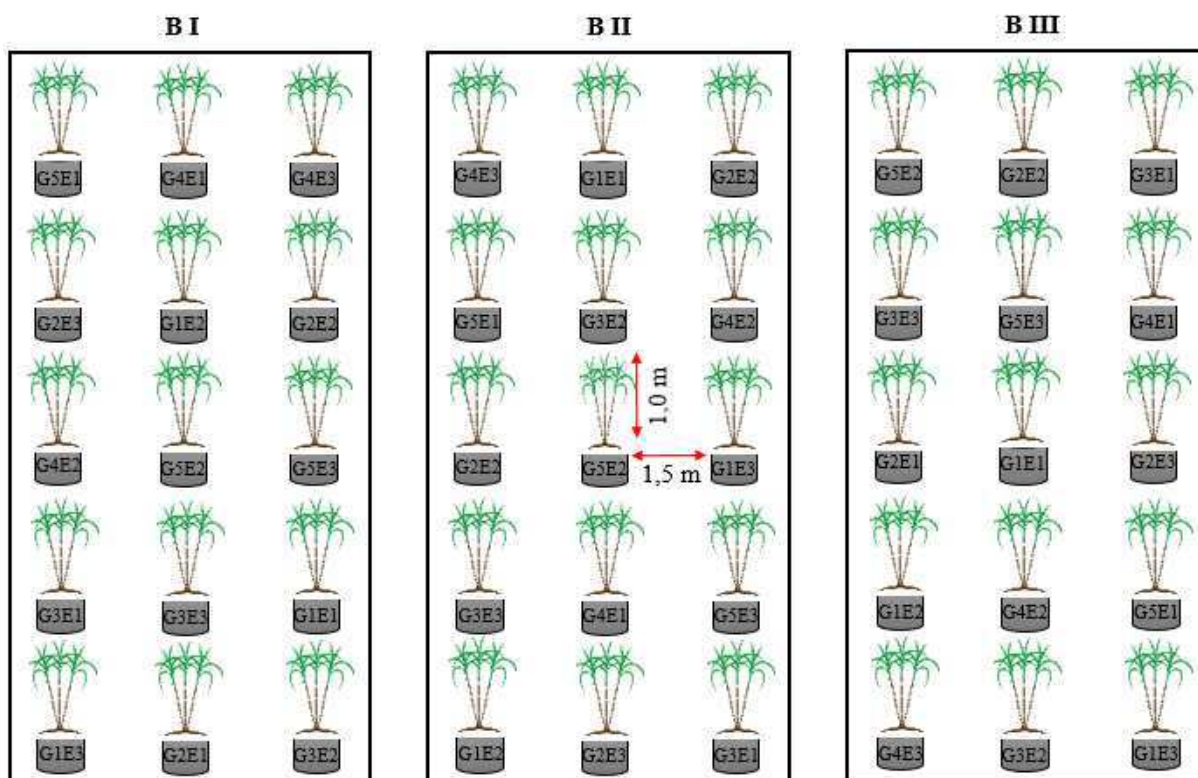
Os dados de temperatura e umidade relativa do ar média da área interna da casa de vegetação coletados diariamente durante o período experimental estão na Figura 6.



**Figura 6.** Temperatura e umidade relativa do ar média coletadas na área interna da casa de vegetação durante o período experimental, obtidos com auxílio de um termo-higrômetro digital

### 6.2 Fatores em estudo, tratamentos e delineamento estatístico

Os tratamentos resultaram da combinação entre dois fatores: cinco genótipos comerciais de cana-de-açúcar (G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443) submetidos a três estratégias de manejo (E1 - Irrigação plena durante todo ciclo da cultura, E2 - déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico). O déficit hídrico ocorreu nas fases de perfilhamento e alongamento, correspondendo a 30% do volume de água aplicado nas plantas sob irrigação plena. Os tratamentos foram organizados no delineamento experimental de blocos casualizados, em esquema fatorial 5 × 3, resultando em 15 tratamentos, com três repetições, perfazendo 45 unidades experimentais (Figura 7).



**Figura 7.** Distribuição dos tratamentos na área experimental. E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato, E3- déficit hídrico. G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443.

A concentração de piruvato (30 mM) foi estabelecida com base em estudo desenvolvido por Shen et al. (2017) com *Arabidopsis thaliana*, em que os autores utilizaram a aplicação exógena de piruvato. Considerando que a pesquisa original foi realizada em amostras de folhas incubadas de uma espécie não cultivada (*Arabidopsis*), foi realizado um ajuste na concentração de piruvato. O ajuste também se baseou no estudo desenvolvido por Barbosa et al. (2021), que usaram 50 mM de piruvato em plantas de amendoim sob estresse hídrico.

A fonte de piruvato utilizada neste estudo foi o piruvato de cálcio por ser considerado um produto de baixo custo e ser facilmente encontrado no comércio, quando comparado com as demais fontes de piruvato.

### 6.3 Obtenção e características dos materiais genéticos utilizados no experimento

A seleção dos materiais genéticos foi fundamentada na sua importância para o setor sucroenergético. Todos os materiais foram provenientes da estação experimental da usina Japungu, localizada no município de Santa Rita, PB (6° 59' 20" S e 35° 1' 14" W). Na Tabela 1 estão dispostas as características dos genótipos de cana-de-açúcar analisados na pesquisa.

**Tabela 1.** Resumo das características dos genótipos de cana-de-açúcar.

Genótipos	Características
RB863129	Hábito de crescimento semidecumbente, bainhas verdes e levemente arroxeadas, de fácil despalha. Médio teor de sacarose, tolerante ao estresse hídrico e boa brotação em soqueiras.
RB92579	É uma variedade tolerante à seca, com hábito de crescimento ereto, folhas de difícil despalha, entrenós de cor roxa ao sol e amarelo-verde sob a palha. Alto teor de açúcares totais recuperáveis (ATR) e médio teor de fibra.
RB962962	Hábito de crescimento ereto, rápido desenvolvimento, perfilhamento médio, quantidades de folhas regular. Alto teor de sacarose, tolerante ao estresse hídrico, excelente brotação em cana-planta e em soqueiras.
RB021754	Tem hábito de crescimento levemente decumbente, perfilhamento e despalha médio, cor amarelo verde sob a palha e roxo quando exposto ao sol, com muita cera no entrenó e alto teor de sacarose. Além disso, tem média restrição de água.
RB041443	Tem hábito de crescimento ereto, perfilhamento e despalha médio, colmo de cor roxo sob a palha e quando exposto ao sol, com muita cera no entrenó, alto teor de sacarose e tolerante ao estresse hídrico.

Fonte: RIDESA (2021).

#### 6.4 Instalação e condução do experimento

As plantas foram cultivadas em vasos de polietileno adaptados como lisímetros, em que receberam na base uma camada de 2,0 cm de brita e uma manta geotêxtil para evitar obstrução do sistema de drenagem, distribuídos em arranjo espacial de 1,0 m x 1,5 m. Em cada lisímetro foi conectada uma mangueira de 10,0 mm de diâmetro, acoplada em dois coletores com capacidade volumétrica de 2,0 L para coleta da água drenada, conforme Figura 8.



**Figura 8.** Ilustração da preparação dos lisímetros de drenagem para o preenchimento com solo.



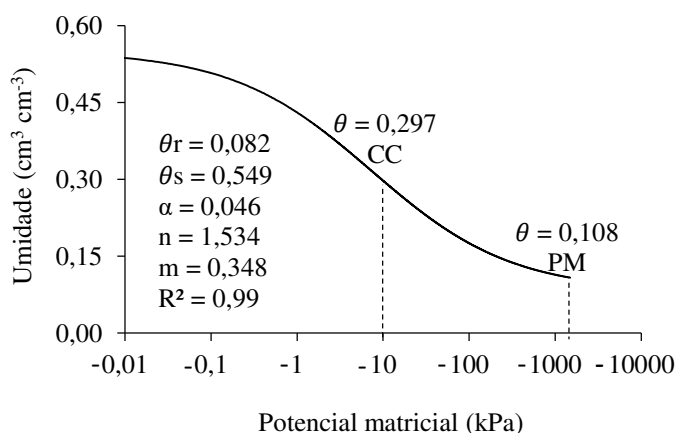
Os vasos foram preenchidos com solo de textura franco-arenosa (45 dm<sup>3</sup>), classificado como Neossolo Regolítico (Entisol), proveniente do município de Lagoa Seca, Paraíba, Brasil, cujos atributos físicos e químicos foram determinados de acordo com a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017) (Tabela 2).

**Tabela 2.** Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento.

Atributos químicos				Atributos físicos	
	Início	Final			
pH	6,50	6,46	-	Areia	63,48%
P	79,0	50,64	mg dm <sup>-3</sup>	Silte	25,14%
K <sup>+</sup>	0,24	0,20	cmolc dm <sup>-3</sup>	Argila	11,38%
Ca <sup>2+</sup>	9,50	6,12	cmolc dm <sup>-3</sup>	Densidade do solo	1,13 g cm <sup>-3</sup>
Na <sup>+</sup>	0,51	2,54	cmolc dm <sup>-3</sup>	Densidade das partículas	2,72 g cm <sup>-3</sup>
Mg <sup>2+</sup>	5,40	8,00	cmolc dm <sup>-3</sup>	Porosidade	58,45%
Al <sup>3+</sup>	0,00	0,20	cmolc dm <sup>-3</sup>	Potencial matricial (kPa)	Umidade (%)
H <sup>+</sup>	0,90	1,32	cmolc dm <sup>-3</sup>	Natural	0,55
SB	15,65	16,86	cmolc dm <sup>-3</sup>	- 10	24,86
CTC	16,55	18,38	cmolc dm <sup>-3</sup>	- 33	17,05
V	94,56	91,73	%	- 100	12,57
m	0,00	1,17	%	- 500	9,01
M.O	8,10	21,00	g dm <sup>-3</sup>	- 1000	8,91
				- 1500	8,84

pH (H<sub>2</sub>O) - potencial hidrogeniônico; P- fósforo; K<sup>+</sup> - potássio; Ca<sup>2+</sup> - cálcio; Na<sup>+</sup> - sódio; Mg<sup>2+</sup> - magnésio; Al<sup>3+</sup> - alumínio; H<sup>+</sup> - hidrogênio; SB - soma de bases; CTC - capacidade de troca de cátions a pH 7,0; Mehlich (P, K, Na); Cloreto de potássio 1N (Ca, Mg e Al); Acetato de Cálcio pH 7,0 (H + Al); V- saturação por bases; m - saturação por alumínio e M.O - matéria orgânica.

Com os valores da umidade do solo nas tensões de - 10, - 33, - 100, - 500, - 1000 e - 1500 kPa, foi realizado o ajuste da curva de retenção de água no solo (Figura 9). Para a obtenção dos parâmetros de ajustes, os valores de umidade volumétrica ( $\theta$ ) correspondentes aos potenciais matriciais aplicados ( $\Psi_m$ ) foram modelados através do software RETC 6.0 modelo não-linear proposto por Van Genuchten (1980).

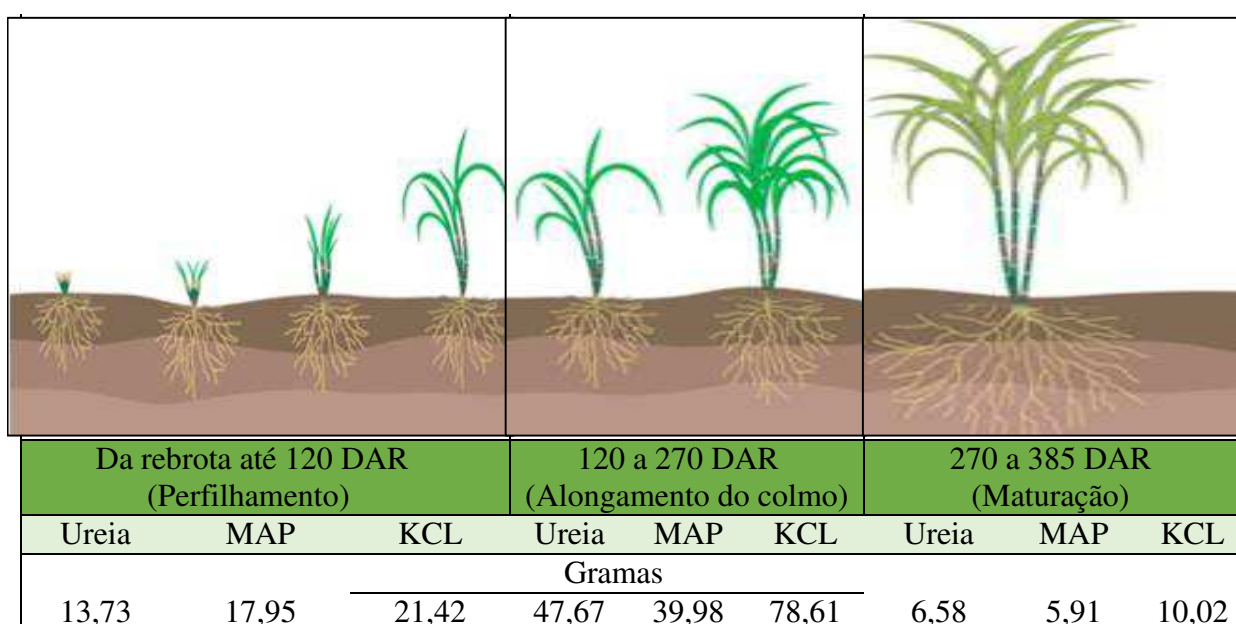


**Figura 9.** Curva de retenção de água do solo, através do software RETC.  $\theta_r$  - umidade residual do solo;  $\theta_s$  - umidade do solo na saturação;  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  são os parâmetros de ajuste do modelo. CC - capacidade de campo; PM - ponto de murcha.

Após a colheita da cana planta (primeira produção de colmos após o plantio), iniciou-se o segundo ciclo de cultivo (cana soca). Os vasos foram irrigados, regularmente, próximo ao nível da capacidade de campo até o momento de implantação dos tratamentos hídricos.

### 6.5 Manejo da adubação

As adubações com nitrogênio, fósforo e potássio foram aplicadas semanalmente, via água de irrigação e ajustadas de acordo com a marcha de absorção da cultura para cada fase fenológica (Marin et al., 2009; Souza et al., 2016), sendo usado por vaso, em todo o ciclo, um total de aproximadamente 68 g de ureia (45% N), 64 g de monoamônio fosfato (51% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 11% N) e 110 g de cloreto de potássio (60% K<sub>2</sub>O), conforme apresentado na Figura 10.



**Figura 10.** Detalhamento da quantidade de macronutrientes (N P K) utilizados no experimento em cada fase fenológica da cultura. DAR- dias após a rebrota, MAP- monoamônio fosfato, KCL- cloreto de potássio.

Os micronutrientes foram aplicados em intervalos de 15 dias para evitar deficiência nutricional e limitação no desenvolvimento da cultura, sendo aplicado em cada evento 1,0 g L<sup>-1</sup> de Quimifol® (Mg (5,0%), S (11,0%); B (3,5%); Cu (0,10%); Fe (0,20%); Mn (1,0%); Mo (0,10%) e Zn (6,0%)), com auxílio de um pulverizador costal.

### 6.6 Aplicação dos tratamentos

A fonte de piruvato utilizada no experimento foi o piruvato de cálcio, adquirido na empresa NatusVita® (Palhoça, SC). A solução foi obtida a partir da dissolução do piruvato de cálcio em água destilada, sendo preparada minutos antes da pulverização e aplicada com auxílio

de um pulverizador costal da Jacto (modelo Jacto XP, capacidade de 12 L, pressão de trabalho (máxima) 88 psi (6 bar) e Bico JD 12P), realizada a partir das 17 h, em todas as folhas da planta. O volume da solução aplicado variou entre 100 e 200 mL por parcela experimental de acordo com o crescimento das plantas. Toda aplicação dos tratamentos está descrita na Tabela 3.

**Tabela 3.** Detalhamento das aplicações dos tratamentos.

	Déficit hídrico		Aplicação via foliar		
	Período (DAR)	Total (Dias)	Piruvato	Água	Total
			Período (DAR)		
E1	-	-	-	-	-
E2	24 a 64 e 182 a 211	71	39 a 63 e 192 a 210	-	23
E3	24 a 64 e 182 a 211	71	-	39 a 63 e 192 a 210*	23

E1 - Irrigação plena durante todo ciclo da cultura, E2 - déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico. \*As plantas sob déficit hídrico que não receberam piruvato (E3), foram pulverizadas com água destilada mais espalhante adesivo. DAR – dias após a rebrota. As aplicações foram realizadas em intervalos de dois dias entre cada aplicação.

O espalhante adesivo (Wil Fix®) foi incluindo nas soluções para uma melhor aderência e absorção. Além disso, para evitar a deriva, durante as pulverizações, as plantas de cada lisímetro foram protegidas com plástico e o solo coberto com uma manta impermeável para evitar escorrimento para a superfície do solo.

Para determinação do teor de umidade ao final do déficit hídrico (64 e 211 DAR) foram coletadas amostras de solo com auxílio de um mini-trado em seguida, para obtenção de massa úmida elas foram colocadas em recipientes de alumínio e pesadas. Após essa etapa, foram levadas para secarem em estufa a 105 °C por 72 horas para determinar a massa seca. Assim, foi possível calcular o teor de umidade do solo em base gravimétrica (Teixeira et al., 2017).

### 6.7 Manejo da irrigação

As irrigações foram realizadas diariamente, às 17 horas, aplicando em cada vaso o volume de água correspondente a demanda da planta. O volume aplicado em cada vaso por evento de irrigação, foi estimado por meio de balanço hídrico, individualmente por vaso, tomando como base a Equação 1. Uma fração de lixiviação de 20% foi usada mensalmente para remover o excesso de sais do solo.

$$CH = Va - Vd \quad (1)$$

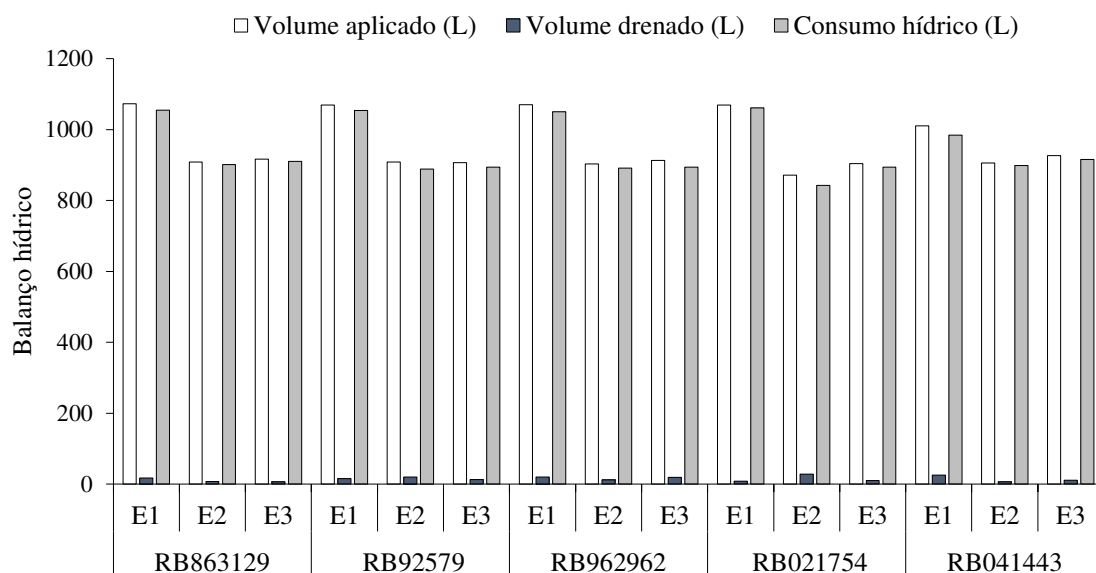
em que:

CH - consumo hídrico (mL);

Va - volume aplicado no evento de irrigação anterior (mL); e

Vd - volume drenado e quantificado na manhã seguinte (mL).

Ao final do déficit hídrico em cada fase de desenvolvimento (64 e 211 dias após a rebrota), em todos os tratamentos foi restabelecida a umidade do solo próximo ao nível correspondente ao da capacidade de campo. Além disso, durante todo o período experimental foram registrados os volumes de água aplicados e drenados, para avaliação do balanço hídrico (Figura 11).



**Figura 11.** Balanço hídrico de cinco genótipos de cana-de-açúcar em função das estratégias de manejo. E- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico.

## 6.8 Tratos culturais

O controle de pragas e doenças foi realizado de forma preventiva com defensivos preconizados para a cultura, conforme a necessidade. O controle de ervas daninhas foi realizado periodicamente de forma manual.

## 6.9 Parâmetros, variáveis, e atributos analisados

### 6.9.1 Conteúdo relativo de água

Aos 211 DAR foram retirados cinco discos da folha +2, pesados para determinação da massa fresca, posteriormente, imersos em água destilada por 24 h para obtenção da massa túrgida, em seguida, levados à estufa de circulação forçada de ar por um período de 72 h a 65 °C para determinação da massa seca (Barrs; Weatherley, 1962), conforme Equação 2.

$$CRA = \frac{(MF - MS)}{(MT - MS)} \times 100 \quad (2)$$

em que:

CRA - conteúdo relativo de água (%);

MF - massa seca dos discos (g);

MS - massa fresca dos discos (g); e

MT - massa turgida dos discos (g).

#### 6.9.2 Parâmetros de trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*

As avaliações das trocas gasosas foram efetuadas aos 211 DAR (final do déficit hídrico), no horário compreendido entre 7h30min e 10 h para se obter os dados de condutância estomática ( $g_s$ ) ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), transpiração ( $E$ ) ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ) ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ). As leituras foram feitas no terço médio da folha +1 do colmo principal, com um equipamento portátil de trocas gasosas (Infra Red Gas Analyser - IRGA, marca ADC BioScientific Ltd, modelo LC-Pro), em condições naturais de temperatura do ar, concentração de  $\text{CO}_2$  e com fonte artificial de radiação de  $2.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Konrad et al., 2005; Magalhães Filho et al., 2008).

Na data citada em linhas anteriores foram executadas medições da fluorescência da clorofila *a*, com uso do fluorômetro de pulso modulado (modelo OS5p da Opti-Science, Hudson, NH, EUA), com intensidade do pulso de saturação de  $11.250 \mu\text{mols}$  e largura de pulso de saturação de  $0,8 \text{ s}$ , obtendo-se a fluorescência inicial ( $F_o$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ), fluorescência variável ( $F_v$ ) e a eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ). As avaliações foram em folhas com adaptação da parte do limbo ao escuro por um período de 30 minutos, usando um clipe do equipamento, de modo a garantir que todos os aceptores primários estivessem totalmente oxidados (Konrad et al., 2005).

Após as avaliações da fluorescência com adaptação ao escuro procedeu-se as avaliações em condições de iluminação, pelo protocolo 'Yield', com intensidade do pulso de saturação de  $11.250 \mu\text{mols}$ , largura de pulso de saturação de  $0,8 \text{ s}$  e default PAR de  $120 \mu\text{E}$ , para determinar a fluorescência inicial antes do pulso de saturação ( $F'$ ), fluorescência máxima após adaptação à luz saturante ( $F_m'$ ), taxa de transporte de elétrons (ETR) e eficiência quântica do fotossistema II ( $Y$ ). A partir desses resultados foram determinados o coeficiente de extinção não fotoquímica de Stern-Volmer (NPQ), coeficiente de extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila (QCN), rendimento quântico de extinção fotoquímica regulada (YNPQ) e não regulada (YNO) (Oxborough; Baker, 1997; Kramer et al., 2004).

### 6.9.3 Pigmentos fotossintéticos

Para determinação do conteúdo de clorofila *a*, *b* e carotenoides, aos 211 DAR foi retirado um disco foliar de 6 mm de diâmetro da folha +2 de cada tratamento, desprezando a nervura central. Os discos foram acondicionados em tubos de vidros protegidos com papel alumínio contendo 6 mL de acetona 80% e mantidos no escuro e em refrigerador durante 48 h. Logo após, foi coletado o sobrenadante contendo os pigmentos extraídos e executadas as leituras de absorvância em espectrofotômetro (modelo UV/VIS-UV1720, AKSON®, São Leopoldo, RS, Brasil), com comprimento de onda de 470, 645 e 663 nm. A partir dessas leituras foram calculados o conteúdo de clorofila *a*, *b* e os carotenoides, pelas equações (3, 4 e 5) propostas por Arnon (1949) e Lichtenthaler (1987). Os valores foram expressos em µg de pigmento por grama de massa fresca.

$$\text{Clorofila } a = \frac{((12,7 \times A_{663}) - (2,79 \times A_{647})) \times V}{\text{MF}} \quad (3)$$

$$\text{Clorofila } b = \frac{((22,9 \times A_{647}) - (5,10 \times A_{663})) \times V}{\text{MF}} \quad (4)$$

$$\text{Carotenoides} = \frac{(((1000 \times A_{470}) - (1,82 \times \text{Chl } a) - (85,02 \times \text{Chl } b))/198) \times V}{\text{MF}} \quad (5)$$

em que:

$A_{470}$ ,  $A_{663}$  e  $A_{647}$  - são as absorvâncias em 480, 663 e 645 nm, respectivamente;

$V$  - volume de acetona a 80% utilizado na extração (mL); e

$\text{MF}$  - massa de matéria fresca (g).

### 6.9.4 Análises bioquímicas

Ao final do déficit hídrico (211 DAR) foram coletadas (pela manhã) amostras da folha +2 de cada tratamento para as análises bioquímicas, logo em seguida, envolvidas em papel alumínio e armazenadas em freezer a -80 °C. Para a extração de proteínas, foi empregada a metodologia descrita por Pereira et al. (2015) e quantificadas pelo método de Bradford (1976) em espectrofotômetro no comprimento de onda de 595 nm.

A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi determinada de acordo com Giannopolitis; Reis (1977) e Beauchamp; Fridovich (1973), em que foi utilizado 20 µL de extrato proteico foliar, 1780 µL do meio de reação constituído de tampão fosfato de potássio (TFK) 0,5 mM a pH 7,8, EDTA a 0,1 M, cloreto de azul nitroblutetrazólio (NBT) 75 µM, metionina (13 mM) e riboflavina (2 µM). A solução resultante foi exposta a luz fluorescente

(75 W) durante 15 minutos e analisada em espectrofotômetro no comprimento de onda de 560 nm. Os valores foram expressos em unidades de SOD  $\text{mg}^{-1}$  de proteínas.

A atividade da catalase (CAT) foi determinada a partir de 50  $\mu\text{L}$  do extrato proteico foliar misturado a 334  $\mu\text{L}$  de tampão TFK 0,3 M (pH 7,5), 250  $\mu\text{L}$  de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 10 mM e 1366  $\mu\text{L}$  de água destilada, completando volume final de 2 mL em cubeta de quartzo (Havir; McHale, 1987). As leituras foram através de espectrofotômetro no comprimento de onda de 240 nm e os valores expressos em  $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$  de proteína.

Para determinar a atividade da ascorbato peroxidase (APX), alíquotas de 100  $\mu\text{L}$  do extrato foram adicionadas a 334  $\mu\text{L}$  de tampão TFK, 20  $\mu\text{L}$  de peróxido de hidrogênio (10 mM), 20  $\mu\text{L}$  de ascorbato de sódio a 0,5 mM e 1526  $\mu\text{L}$  de água destilada, completando volume final de 2 mL em cubeta de quartzo e analisadas em espectrofotômetro no comprimento de onda de 290 nm (Nakano; Asada, 1981). Valores expressos em  $\mu\text{mol ASC min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$  de proteína.

O teor de prolina (PROL) foi analisado de acordo com o método de Bates et al. (1973). O material vegetal (0,250 g) foi macerado em 5 mL de ácido sulfosalicílico (3,0%) e centrifugado a 12.000 RPM por 10 min. Posteriormente, foi coletado 1 mL do sobrenadante em tubo de ensaio e adicionados 1 mL de ninhidrina ácida, 1 mL de ácido acético glacial, e aquecidos a 100 °C durante 1 h, decorrido esse tempo a reação foi paralisada em banho de gelo. Em seguida, foram adicionados 2 mL de tolueno e agitados vigorosamente em vórtex. A leitura de absorbância foi realizada a 520 nm em espectrofotômetro, tendo o tolueno como branco.

#### 6.9.6 Variáveis de crescimento

As avaliações de crescimento das plantas foram realizadas aos 211 dias após a rebrota (DAR), mensurando a altura da planta (AP - cm), da base do solo até a folha +1, número de folhas (NF), número de entrenós (NE), diâmetro do colmo (DC - mm) e área foliar (AF -  $\text{cm}^2$ ).

A altura da planta foi mensurada desde a base até a lígula da folha +1; o diâmetro do colmo no terço médio da planta, com auxílio de paquímetro digital. A área foliar determinada conforme Hermann; Câmara (1999), Equação 6.

$$AF = C \times L \times 0,75 \times (N + 2) \quad (6)$$

em que:

C - comprimento da folha +3;

L - largura da folha +3;

0,75 - fator de correção para área foliar da cultura; e

N - número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde.

#### 6.9.7 Componentes de produção e produtividade da água

Por ocasião da colheita (385 DAR), em três colmos de cada parcela, foram avaliados o comprimento do colmo (AC - cm), diâmetro do colmo (DC - mm), aferido na parte inferior, mediana e superior do colmo, número de colmos (NC), número de entrenós (NE), comprimento de entrenós (CE - cm) e massa de colmos (MC - kg).

A produtividade da água ( $Y_a$ ) foi obtida pela relação da massa de colmos por parcela (kg) e o volume total de água consumido durante o ciclo (L), adaptado de Geerts; Raes (2009). Valores expressos em  $g L^{-1}$ .

#### 6.9.8 Atributos tecnológicos da cana-de-açúcar

Após a pesagem dos colmos foram retirados três colmos (mais desenvolvidos) de cada parcela, identificados e encaminhadas ao laboratório da usina Japungu para determinação do peso do bolo úmido (PBU - g), sacarose polarizada (Pol - %), sólidos solúveis (SS - °Brix), teor de sacarose aparente do caldo (Polc - %), pureza (PZA - %), pol da cana corrigido (PCC - %), teor de fibras (Fibras - %), porcentagem de açúcares redutores na cana (ARC - %) e açúcares totais recuperáveis (ATR -  $kg t^{-1}$ ), conforme metodologia descrita por Consecana (2006).

### 7 Análise estatística

Previamente à análise de variância, os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk). Em algumas variáveis foi necessário fazer transformação de dados e o modelo ' $\sqrt{x}$ ' atendeu, plenamente, a condição de normalidade. Com resultados positivos obtidos desses testes foi feita análise de variância e teste 'F'. Em seguida, foi aplicado o teste de médias com uso de Tukey ( $p \leq 0,05$ ), através do Software Sisvar 5.8 (Ferreira, 2019).

Para variáveis significativas apenas para o fator genótipo foi realizado a análise de Cluster, com finalidade de verificar o agrupamento dos genótipos. Além disso, para corroborar com os resultados apresentados na análise univariada, foi realizada uma análise multivariada através de componentes principais (ACP); para tanto, os dados foram normalizados para média zero ( $= 0,0$ ), variância unitária ( $\sigma^2 = 1,0$ ), autovalores ( $\lambda > 1,0$ ) e variância total ( $\sigma^2 > 10\%$ ) (Govaerts et al., 2007). Somente variáveis com coeficiente de correlação de Pearson acima de 0,5 foram mantidas na composição de cada componente principal (CP) (Hair et al., 2009). As análises foram processadas pelo software Statistica 7.0 (Statsoft, 2004).



## 8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 8.1 Umidade e potencial matricial de água no solo

Aos 64 e 211 dias após a rebrota (DAR), a média de umidade do solo foi 0,249 e 0,245  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  (E1), 0,145 e 0,129  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  (E2) e 0,117 e 0,131  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  em E3, atingindo potencial matricial de - 22,23 e 23,73 kPa (E1), - 234,3 e - 430,2 kPa (E2) e - 265,1 e - 392,6 kPa (Tabela 4).

**Tabela 4.** Umidade e potencial matricial de água no solo.

Genótipos	64 DAR					
	E1		E2		E3	
	Umidade ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\psi_m$ (kPa)	Umidade ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\psi_m$ (kPa)	Umidade ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\psi_m$ (kPa)
RB863129	0,259	- 18,61	0,149	- 207,9	0,138	- 305,8
RB92579	0,240	- 25,93	0,143	- 254,6	0,145	- 237,5
RB962962	0,240	- 25,93	0,142	- 263,7	0,141	- 273,3
RB021754	0,266	- 16,55	0,145	- 237,5	0,139	- 294,1
RB041443	0,244	- 24,14	0,149	- 207,9	0,148	- 214,8
Média total	0,249	- 22,23	0,145	- 234,3	0,117	- 265,1
	211 DAR					
	E1		E2		E3	
	Umidade ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\psi_m$ (kPa)	Umidade ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\psi_m$ (kPa)	Umidade ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\psi_m$ (kPa)
RB863129	0,242	- 25,01	0,126	- 504,4	0,135	- 342,9
RB92579	0,257	- 19,27	0,133	- 371,6	0,131	- 403,9
RB962962	0,240	- 25,93	0,133	- 371,6	0,133	- 371,6
RB021754	0,234	- 28,88	0,127	- 481,6	0,129	- 440,9
RB041443	0,256	- 19,60	0,130	- 421,6	0,131	- 403,9
Média total	0,245	- 23,73	0,129	- 430,2	0,131	- 392,6

$\Psi_m$ - potencial matricial; E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação com 30 mM de piruvato e E3- déficit hídrico.

O teor de água no solo e a energia com a qual ela está retida nos poros ou absorvida nas partículas minerais fornece informações importantes sobre a habilidade do solo em reter e liberar água, dando ideia do volume de água disponível às plantas (Melo Filho et al., 2015). Nesse sentido, o conteúdo de água é avaliado nos potenciais de - 30 ou - 10 kPa para a capacidade de campo e - 1500 kPa para o ponto de murcha. No entanto, de acordo com Carlesso (1995), determinações laboratoriais do ponto de murcha e da capacidade de campo frequentemente não conferem com valores obtidos a campo.

### 8.2 Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a, aos 211 DAR

De acordo com o teste F (Tabela 5) houve efeito significativo entre genótipos (G) para a taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  (A), fluorescência inicial ( $F_o$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ), fluorescência variável ( $F_v$ ), fluorescência inicial antes do pulso de saturação ( $F'$ ), fluorescência máxima após adaptação à luz saturante ( $F_m'$ ) e a taxa de transporte de elétrons (ETR), extinção

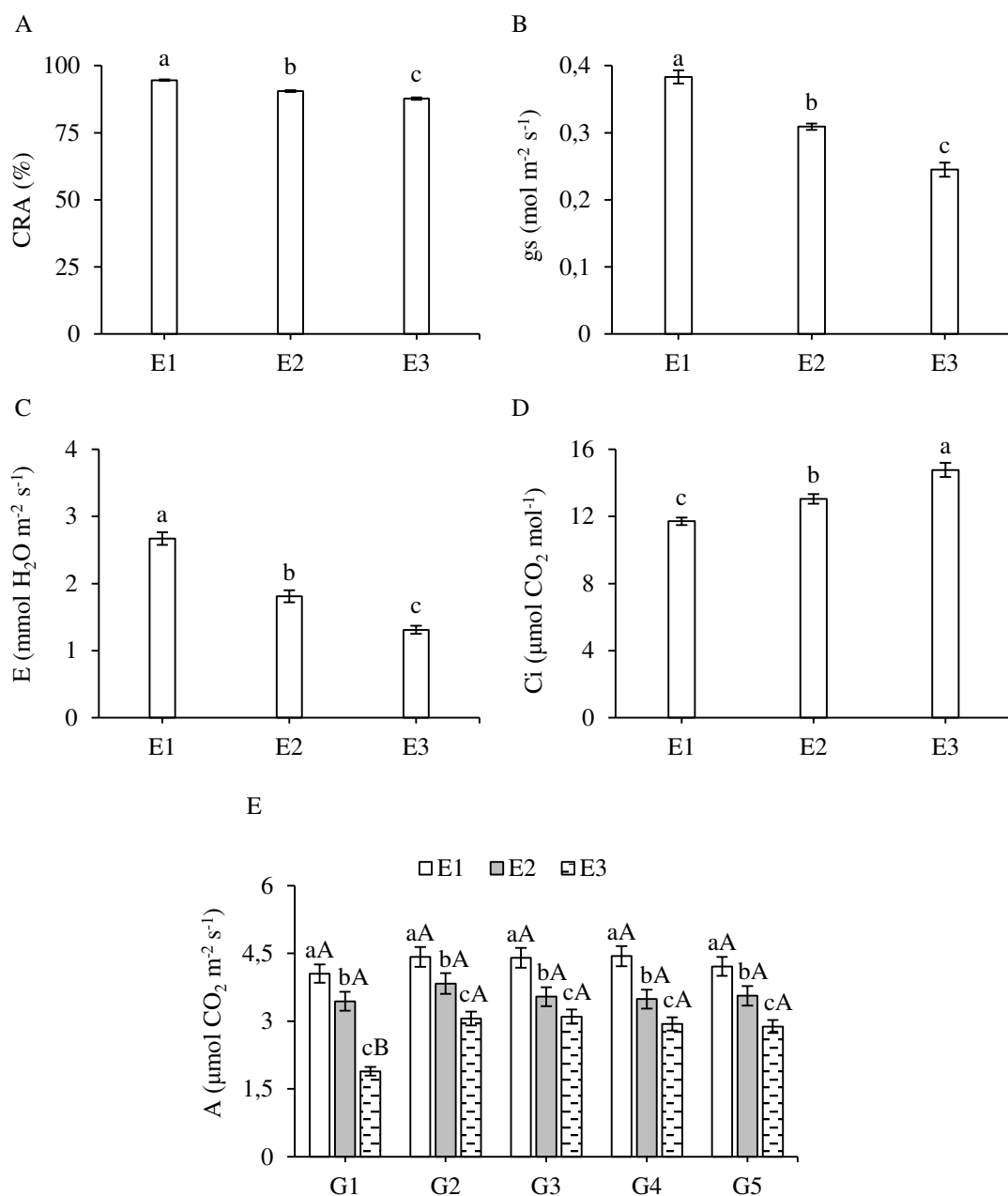
não fotoquímica de Stern-volmer (NPQ), extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila (QCN) e rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada (YNO). Para as estratégias de manejo, efeito significativo foi registrado sobre todos os parâmetros fisiológicos. A interação entre genótipos vs estratégias de manejo (G × E) foi significativa apenas sobre a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (A).

**Tabela 5.** Teste F para parâmetros de trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* de cinco genótipos de cana-açúcar submetidos a três estratégias de manejo, aos 211 DAR.

F. Variação	Teste F								
	CRA	gs <sup>1</sup>	E	Ci <sup>1</sup>	A <sup>1</sup>	Fo	Fm	Fv	Fv/Fm
Genótipos (G)	ns	ns	ns	ns	**	*	**	*	ns
Estratégias (E)	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Int. (G × E)	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
Bloco	ns	ns	*	ns	ns	*	**	ns	ns
CV (%)	1,59	10,64	13,81	7,94	5,64	9,85	4,16	6,53	4,36
	F'	Fm'	ETR	Y	NPQ	QCN	YNO	YNPQ	
Genótipo (G)	*	**	**	ns	**	**	**	ns	
Estratégias (E)	**	**	**	**	**	**	**	**	
Int. (G x E)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
Bloco	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
CV (%)	15,90	12,06	9,85	17,98	14,96	2,96	18,69	19,82	

CV- Coeficiente de variação; \*\* e \* - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente. ns - não significativo. <sup>1</sup>Dados Transformados em  $\sqrt{x}$ . CRA- conteúdo relativo de água; gs- condutância estomática; E- transpiração; CO<sub>2</sub>- concentração interna de CO<sub>2</sub>; A- taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>; Fo- fluorescência inicial; Fm- fluorescência máxima; Fv- fluorescência variável; Fv/Fm- eficiência quântica máxima do PSII; F'- fluorescência inicial antes do pulso de saturação; Fm'- fluorescência máxima após adaptação a luz saturante; ETR- taxa de transporte de elétrons; Y- eficiência quântica do PSII; NPQ- extinção não fotoquímica de Stern-volmer; QCN- extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila; YNO- rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada e YNPQ- rendimento quântico de extinção fotoquímica regulada.

O déficit hídrico imposto na fase de perfilhamento e alongamento do colmo (E3), reduziu 7,3, 36,0 e 50,9% o conteúdo relativo de água (CRA), condutância estomática (gs) e transpiração (E), respectivamente, quando comparado com às plantas controle (E1) (Figura 12A, B, C). Em contrapartida, observou-se que o déficit hídrico aumentou 26,1% a concentração interna de carbono (Ci), em relação às plantas controle (E1) (Figura 12D).



**Figura 12.** Conteúdo relativo de água - CRA (A), condutância estomática - gs (B), transpiração - E (C) e concentração interna de CO<sub>2</sub> - Ci (D) de cana-de-açúcar em função das estratégias de manejo. Taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> - A (E) de cana-de-açúcar em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 211 DAR. Letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre as estratégias de manejo e letras maiúsculas são indicativos de não haver diferença entre genótipos pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato, E3- déficit hídrico. G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443.

O conteúdo relativo de água (CRA) é um parâmetro amplamente utilizado para medir o estado hídrico dos vegetais, pois estima as consequências do déficit hídrico nas células e suas relações com os processos fisiológicos (Barbosa et al., 2021). Na pesquisa aqui apresentada, a suplementação de piruvato em plantas sob déficit hídrico (E2) auxiliou na recuperação do tecido foliar ao seu estado hídrico, pois, em comparação com as plantas que não receberam piruvato (E3), ocorreu aumento de 3,1% no CRA. Esse resultado é indicativo de que houve manutenção do turgor no tecido foliar com a aplicação de piruvato, favorecendo os mecanismos fisiológicos e bioquímicos, a exemplo da condutância estomática e transpiração, com aumento de 20,7 e 27,6%, respectivamente, em relação as estratégias E2 e E3. No estudo de Maia Júnior et al. (2020), verificaram em plantas de cana-de-açúcar, que a aplicação foliar de glicina betaína beneficiou a condutância estomática e a transpiração durante o período de estresse.

O fechamento estomático ocorre no intuito de restringir a perda de água por transpiração, sendo considerado uma estratégia adaptativa das plantas, os estômatos abertos possibilitam a absorção de gás carbônico e ao fecharem, economizam água e restringem o risco de desidratação, e como consequência, reduz a difusão de CO<sub>2</sub> (Laxa et al., 2019). Assim, com o declínio da fixação de CO<sub>2</sub>, a reação com o fosfoenolpiruvato (PEP) será prejudicada, bem como a reação oxaloacetato à malato que desencadeará em alterações metabólicas, refletindo na fotossíntese (Ghannoum, 2009; Sage et al., 2013).

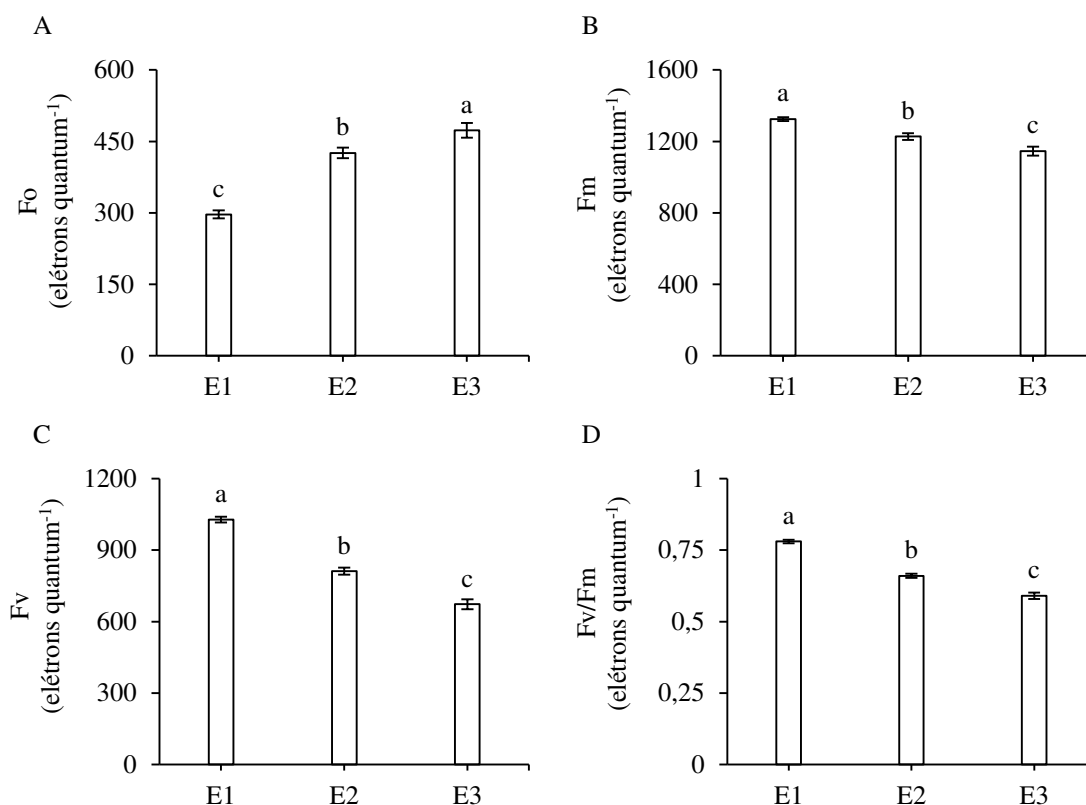
Os baixos valores na concentração interna de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>) observados nas estratégias E1 e E2 (Figura 12D), significa que houve metabolização do carbono que entrava na célula. Pois, à medida que houve aumento na condutância estomática, transpiração e redução no carbono armazenado, foi observada maior taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> em tais estratégias. Além disso, as plantas sob a estratégia E3 não foram eficientes na metabolização do carbono interno, ficando estocado na célula, refletindo em uma baixa taxa fotossintética, quando comparado com as demais estratégias.

A taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> foi influenciada pela interação entre os fatores (Figura 12E), sendo observado em plantas sob déficit hídrico (E3) redução em todos os genótipos, quando comparadas com às plantas controle (E1). Todavia, constatou-se que o genótipo G1 (RB863129) teve menor taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (1,89  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) entre os genótipos estudados, com redução de 53,3%, demonstrando maior sensibilidade ao déficit hídrico. No entanto, ao ser suplementado com piruvato (E2), o decréscimo foi 15,1%, sendo possível afirmar que a suplementação com piruvato aliviou os efeitos do déficit hídrico em plantas de cana-de-açúcar.

Tais resultados podem estar relacionados com a participação do piruvato no processo de respiração celular, que ao ser metabolizado dá origem a moléculas energéticas, aumentando a atividade fotossintética. Além disso, nas plantas C4, o piruvato é transformado em fosfoenolpiruvato, principal acceptor do CO<sub>2</sub> atmosférico nas células do mesófilo (Taiz et al., 2017). Possivelmente, esse composto contribuiu para melhor eficiência na captação do CO<sub>2</sub>, refletindo na atividade das enzimas fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase) e da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase (RuBisCo).

Embora as trocas gasosas sejam importantes para determinar a taxa fotossintética das plantas, elas por si só, podem não ser suficientes para avaliar os efeitos nocivos dos estresses abióticos nos cloroplastos (Hamani et al., 2020). Por isso, uma alternativa é a avaliação da fluorescência da clorofila, que revela o nível de excitação da energia que dirige aos pigmentos fotossintéticos e fornece subsídios para estimar a inibição ou o dano no processo de transferência de elétrons do fotossistema II (PSII) (Bolhàr-Nordenkampf et al., 1989).

Nesse contexto, foram avaliados os parâmetros de fluorescência da clorofila *a* (Figura 13A, B, C e D), sendo observado aumento na fluorescência inicial (59,6%), conseqüentemente, reduções na fluorescência máxima (13,4%), fluorescência variável (34,5%) e eficiência quântica máxima do PSII (24,3%) quando relacionadas as plantas submetidas ao déficit hídrico (E3) em relação as plantas controles (E1), indicando que, o aparato fotossintético foi comprometido. Todavia, quando as plantas submetidas receberam suplementação de piruvato (E2) houve alívio nos parâmetros fluorescência máxima, fluorescência variável e eficiência quântica máxima do PSII, com reduções de 7,3, 21,1 e 15,4%, respectivamente, diferindo estatisticamente da estratégia (E1).



**Figura 13.** Fluorescência inicial -  $F_o$  (A), fluorescência máxima -  $F_m$  (B), fluorescência variável -  $F_v$  (C) e eficiência quântica máxima do PSII -  $F_v/F_m$  (D) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 211 DAR. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre estratégias pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico.

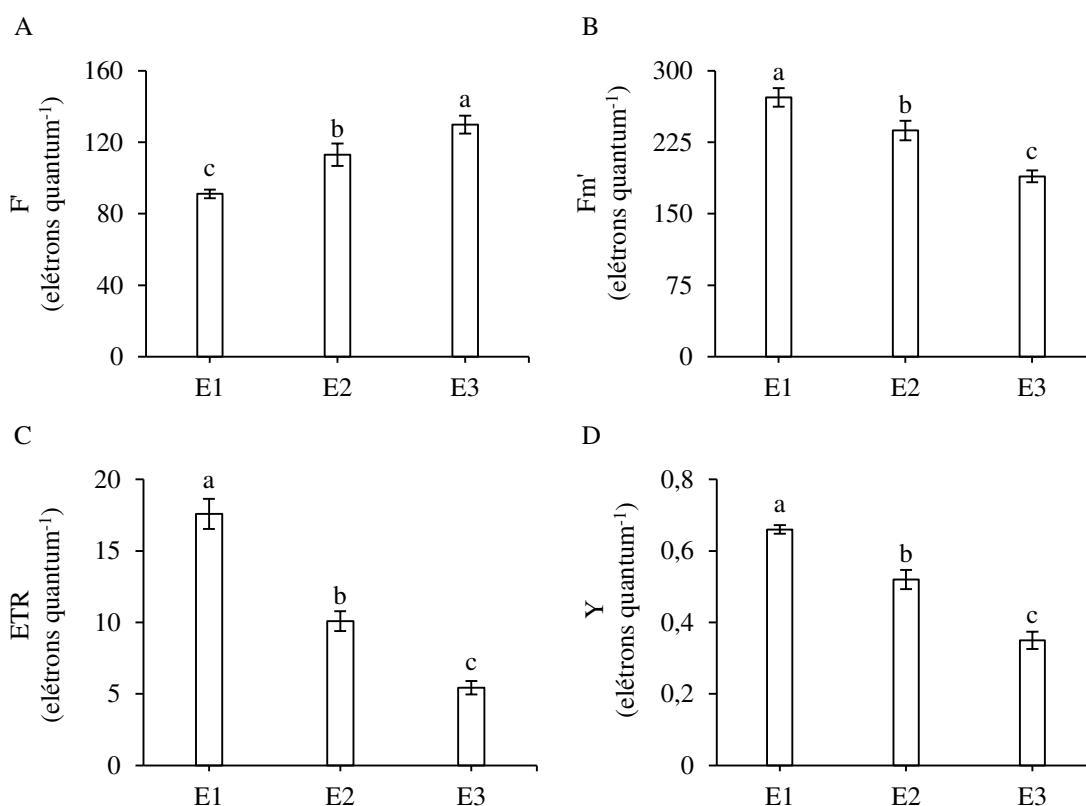
O aumento na fluorescência inicial ( $F_o$ ) em plantas sob déficit hídrico pode ser resultado de danos no centro de reação do PSII ou da redução da capacidade de transferência da energia de excitação da antena para o centro de reação (Baker; Rosenqvist, 2004; Lima et al., 2019). De acordo com Rousseau et al. (2013), a  $F_o$  representa o estado da planta quando os centros de reações do PSII estão oxidados, o aumento nesse parâmetro, reflete diretamente na  $F_m$  e  $F_v$ , que reduz o fluxo de elétrons entre os fotossistemas, e, assim, menor será a capacidade da planta em transferir energia para a formação de NADPH e ATP (Baker, 2008; Lima et al., 2019).

A eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) expressa a eficiência de captura da energia de excitação pelos centros de reação abertos do PSII (Bolhàr-Nordenkampf et al., 1989; Silva et al., 2014). Em condições normais,  $F_v/F_m$  pode variar entre 0,75 e 0,85, enquanto uma queda nesta razão é um indicador de danos estruturais nos tilacóides, afetando a eficiência fotoquímica, a assimilação de  $CO_2$  e, sobretudo, no transporte de elétrons (Bolhàr-Nordenkampf et al., 1989; García-Sánchez et al., 2020). Valores abaixo de 0,75 elétrons

quantum<sup>-1</sup> indicam danos no aparelho fotossintético. Reduções na Fv/Fm em condições de déficit hídrico foram registradas por Silva et al. (2012), ao estudarem parâmetros fisiológicos de quatro genótipos de cana-de-açúcar (RB72454, RB72910, RB92579 e RB867515) em condição de casa-de-vegetação, constataram valores médios de 0,71 elétrons quantum<sup>-1</sup>.

Portanto, elevada Fv/Fm melhora a eficiência do uso da radiação e facilita a assimilação de CO<sub>2</sub> (Herritt et al., 2020). Apesar das plantas que receberam suplementação de piruvato terem apenas 0,66 elétrons quantum<sup>-1</sup>, não chegando aos valores ideais de Fv/Fm (0,75 a 0,84 elétrons quantum<sup>-1</sup>), a suplementação desse composto melhorou o sistema de absorção de luz do PSII, quando comparado com as plantas que não receberam a aplicação desse produto (0,59 elétrons quantum<sup>-1</sup>), sugerindo que o piruvato aliviou os efeitos deletérios do déficit hídrico.

Ao estudar os parâmetros da fluorescência em condições de iluminação, usando o protocolo ‘Yield’, observou-se em plantas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico (E3) aumento na F’ (42,4%) em relação a E1 e de 14,8% em relação a E2 (Figura 14A). Nos parâmetros, Fm’, ETR e Y em plantas submetidas a estratégia E3 as reduções foram 30,4, 69,1 e 46,9%, respectivamente, em relação a E1 e 20,2, 46,2 e 32,6%, em relação a E2 (Figura 14B, C e D).



**Figura 14.** Fluorescência inicial antes do pulso de saturação - F' (A), fluorescência máxima após adaptação a luz saturante - Fm' (B), taxa de transporte de elétrons – ETR (C) e eficiência quântica do PSII – Y (D) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 211 DAR.

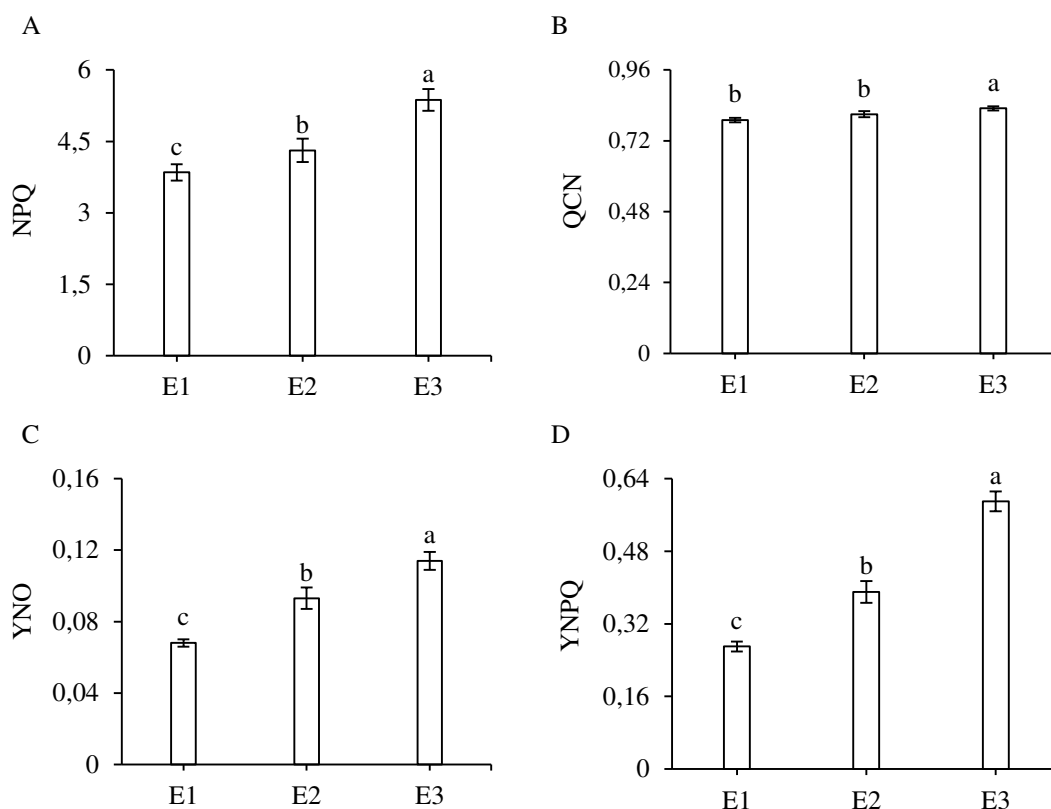
Letras minúsculas indicam diferença estatística entre estratégias pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico.

Em geral, a estratégia E3 influenciou negativamente todos os parâmetros de fluorescência da clorofila aqui estudados. Tais resultados corroboram com os obtidos por Souza et al. (2020), Leanasawat et al. (2021) e Verma et al. (2021b), em cana-de-açúcar sob condições de seca, que registraram reduções nos níveis de emissão de fluorescência.

Além da eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ), a taxa de transporte de elétrons (ETR) também é considerada um parâmetro importante e relevante na determinação da eficiência do aparato fotossintético (Baker; Rosenqvist, 2004). Nesta pesquisa, observou-se efeito negativo do déficit hídrico sobre a taxa de transporte de elétrons (Figura 14C) em plantas que não receberam suplementação de piruvato, indicando uma capacidade reduzida no transporte de elétrons e comprometendo a produção de ATP e NADPH durante a continuidade do processo fotossintético.

Por meio da análise dos coeficientes de extinção, o déficit hídrico no perfilhamento e alongamento do colmo em cana-de-açúcar (E3) afetou o sistema fotossintético, com aumento significativo no NPQ (39,4%), QCN (5,1%), YNO (67,6%) e YNPQ (118,5%), em comparação com a estratégia E1 (Figura 15). No entanto, as plantas que foram suplementadas com piruvato (E2) reduziram significativamente ( $p \leq 0,05$ ) o NPQ (19,7%), QCN (2,4%), YNO (18,4%) e YNPQ (33,8%) em comparação com as plantas submetidas ao déficit hídrico (E3) (Figura 15).





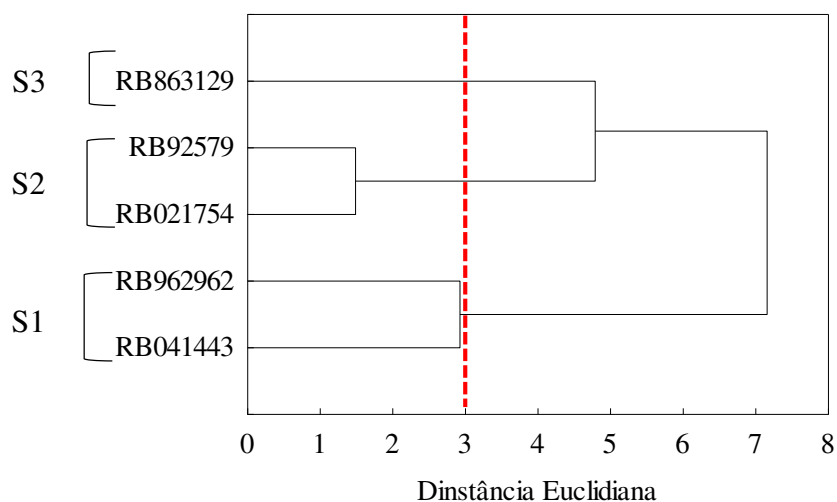
**Figura 15.** Extinção não fotoquímica de Stern-volmer - NPQ (A), extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila - QCN (B), rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada - YNO (C) e regulada - YNPQ (D) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 211 DAR. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre estratégias pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico.

Quando a planta recebe luz solar ocorre uma excitação nas clorofilas que as tornam altamente reativas, caso não tenha uma atenuação, elas se tornarão um elemento gerador de estresse oxidativo (Ruban, 2016). Isso ocorre porque as clorofilas não param de absorver luz, logo, todo o excesso de luz recebido dever ser dissipado, caso essa dissipação seja realizada na forma de calor (NPQ), há aumento na extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila (QCN) e no rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada (YNO), conseqüentemente, no rendimento quântico de extinção fotoquímica regulada (YNPQ), o que corrobora com os resultados encontrados nesse trabalho, pois, as plantas que foram submetidas a estratégia E3 reduziram a eficiência quântica máxima fotoquímica do PSII (Fv/Fm), eficiência quântica do PSII (Y) e a taxa de transporte de elétrons (ETR).

Tais reduções resultaram em aumento na extinção não fotoquímica de Stern-volmer (NPQ) (Figura 15A), extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila (QCN)

(Figura 15B) e no rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada (YNO) (Figura 15C), que, possivelmente, deflagram em processos oxidativos no PSII das plantas. Com isso, a planta precisou dissipar a energia gerada pela absorção de luz, uma vez, que não estava sendo utilizada para fotossíntese, gerando aumento no rendimento quântico de extinção fotoquímica regulada (YNPQ) (Figura 15D). Entretanto, depreende-se que a suplementação com piruvato em plantas sob déficit hídrico (E2) melhorou significativamente todos os parâmetros de fluorescência da clorofila *a* estudado.

De acordo com o dendrograma obtido com análise hierárquica de cluster (Figura 16), foi utilizada a distância Euclidiana como medida de dissimilaridade, estabelecendo um corte na distância 3,0 como critério de inspeção visual, com isso houve a formação de três subgrupos (S) formados a partir dos dados de taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (A), fluorescência inicial (Fo), fluorescência máxima (Fm), fluorescência variável (Fv), fluorescência inicial antes do pulso de saturação (F'), fluorescência máxima após adaptação a luz saturante (Fm'), taxa de transporte de elétrons (ETR), extinção não fotoquímica de Stern-volmer (NPQ), extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila (QCN), rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada (YNO) de cana-de-açúcar em função dos genótipos estudados. O primeiro subgrupo (S1) foi composto pelos genótipos RB041443 e RB962962, o segundo (S2) foi formado por RB021754 e RB92579 e terceiro subgrupo formado unicamente por RB863129.



**Figura 16.** Dendrograma da análise de agrupamento (Cluster Analysis) de genótipos de cana-de-açúcar e formação de subgrupos com similaridade dentro do subgrupo e dissimilaridade entre os subgrupos.

Tais grupos se caracterizam por apresentarem maior similaridade entre os genótipos de cada grupo e maior dissimilaridade entre os grupos em relação às variáveis consideradas. Além

disso, a diferença nos dados obtidos entre os genótipos pode ser explicada em virtude das variações ocorridas na carga genética de cada material, por isso, nesta pesquisa optou-se em realizar a análise de cluster para genótipos, permitindo identificar os materiais mais similares.

A partir da análise de componentes principais (Tabela 6), foi possível condensar os parâmetros fisiológicos em dois componentes (CP<sub>1</sub> e CP<sub>2</sub>) os quais juntos explicaram 93,5% da variância total. O primeiro componente principal (CP<sub>1</sub>) contribuiu com 81,6% da variância total e foi composto pela combinação linear entre o conteúdo relativo de água (CRA), condutância estomática (gs), transpiração (E), taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (A), fluorescência inicial (Fo), fluorescência máxima (Fm), fluorescência variável (Fv), eficiência quântica máxima do PSII (Fv/Fm), fluorescência inicial antes do pulso de saturação (F'), fluorescência máxima após adaptação a luz saturante (Fm'), taxa de transporte de elétrons (ETR), eficiência quântica do PSII (Y), rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada (YNO) e regulada (YNPQ). O segundo componente principal (CP<sub>2</sub>) respondeu por 11,9% da variância remanescente e foi constituído pelo coeficiente extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila (QCN) e extinção não fotoquímica de Stern-volmer (NPQ).

**Tabela 6.** Autovalores, porcentagem de variância total explicada e coeficientes de correlações (r) entre as variáveis originais e os componentes principais, aos 211 DAR.

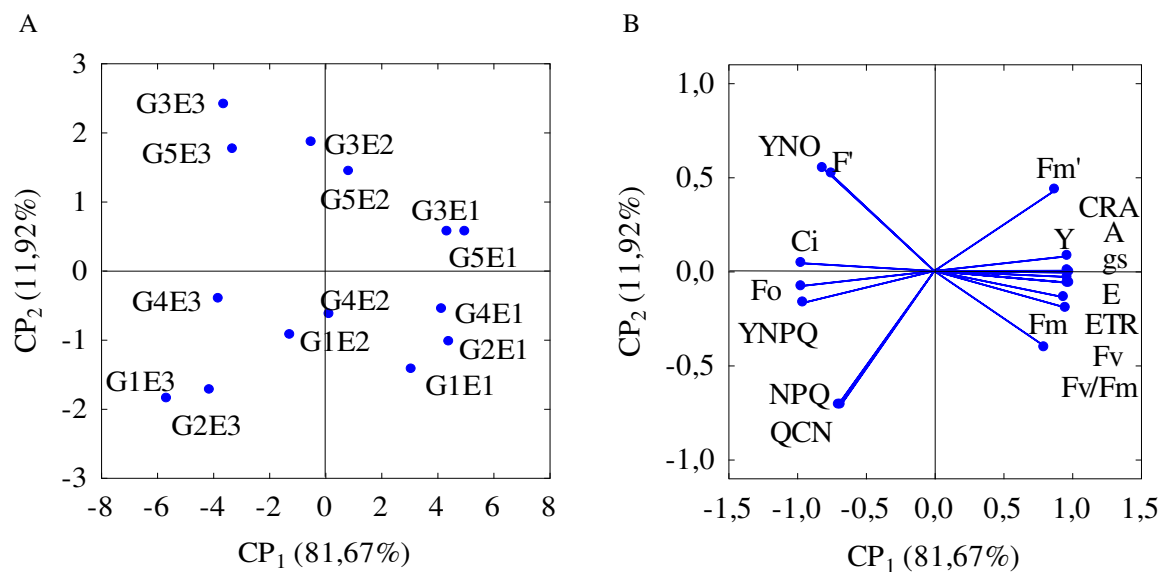
	Componentes principais (CP)								
	CP <sub>1</sub>			CP <sub>2</sub>					
Autovalores ( $\lambda$ )	13,83			2,03					
Porcentagem de variância total (S <sup>2</sup> %)	81,67			11,92					
CPs	Coeficientes de correlação (r)								
	CRA	gs	E	Ci	A	Fo	Fm	Fv	Fv/Fm
CP1	0,95*	0,99*	0,97*	- 0,96*	0,97*	- 0,97*	0,80*	0,96*	0,99*
CP2	- 0,14	- 0,01	- 0,06	0,04	0,01	- 0,08	- 0,40	- 0,19	- 0,06
	F'	Fm'	Y	ETR	QCN	NPQ	YNO	YNPQ	
CP1	- 0,75*	0,88*	0,97*	0,97*	- 0,68	- 0,69	- 0,80*	- 0,96*	
CP2	0,51	0,43	0,08	- 0,03	- 0,71*	- 0,71*	0,55	- 0,17	

CRA- conteúdo relativo de água; gs- condutância estomática; E- transpiração; Ci- concentração interna de CO<sub>2</sub>; A- taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>; Fo- fluorescência inicial; Fm- fluorescência máxima; Fv- fluorescência variável; Fv/Fm- eficiência quântica máxima do PSII; F'- fluorescência inicial antes do pulso de saturação; Fm'- fluorescência máxima após adaptação a luz saturante; ETR- taxa de transporte de elétrons; Y- eficiência quântica do PSII; NPQ- extinção não fotoquímica de Stern-volmer; QCN- extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila; YNO- rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada e YNPQ- regulada.  
\*Variáveis consideradas na ACP, r = 0,10 - 0,39 (fraco), 0,40 - 0,69 (moderado) e 0,70 - 1,00 (forte).

As cargas fatoriais fornecem a influência das variáveis sobre os fatores estudados. As maiores cargas fatoriais foram observadas com os parâmetros gs, Fv/Fm, E, Fo, ETR, Y, Fv, YNPQ, Ci e CRA, com correlação muito forte. E ainda, no CP<sub>1</sub>, à medida que houve redução

nos parâmetros  $C_i$ ,  $F_o$ ,  $F'$ , YNPQ e YNO, houve aumento no CRA, gs, E, A,  $F_m$ ,  $F_v$ ,  $F_v/F_m$ ,  $F_m'$ , Y e ETR (Tabela 6).

A projeção bidimensional das combinações de genótipos de cana-de-açúcar e as estratégias de manejo estão ilustradas na Figura 17A e B. No  $CP_1$ , os genótipos G3 (RB962962) e G5 (RB041443) cultivados sob déficit hídrico (E3), obtiveram valores mais expressivos na fluorescência inicial antes do pulso de saturação ( $F'$ ) e no rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada (YNO). Todavia, ainda no  $CP_1$ , os genótipos G1 (RB863129), G2 (RB92579) e G4 (RB021754) cultivados sob irrigação plena (E1), obtiveram maiores médias na fluorescência máxima ( $F_m$ ), fluorescência variável ( $F_v$ ), eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) e a taxa de transporte de elétrons (ETR). Já os parâmetros fluorescência inicial ( $F_o$ ) e rendimento quântico de extinção fotoquímica regulada (YNPQ), se impuseram como os principais contribuintes para descrever a variabilidade ocorrida no genótipo G4 (RB021754) quando submetido ao déficit hídrico (E3). No  $CP_2$ , o déficit hídrico contribuiu para o aumento da extinção não fotoquímica de Stern-volmer (NPQ) e extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila (QCN) sobre G1 (RB863129) e G2 (RB92579) (Figura 17).



**Figura 17.** Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores estudados (genótipos e estratégias de manejo) (A) e correlação de parâmetros fisiológicos (B) da cana-de-açúcar nos dois componentes principais ( $CP_1$ ) e ( $CP_2$ ). G1- RB863129; G2- RB92579; G3- RB962962; G4- RB021754 e G5- RB041443. E1 - Irrigação plena durante todo ciclo da cultura; E2 - déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico. Conteúdo relativo de água (CRA), condutância estomática (gs), transpiração (E), concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ), taxa de assimilação de  $CO_2$  (A), fluorescência inicial ( $F_o$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ), fluorescência variável ( $F_v$ ), eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ), fluorescência inicial antes do pulso de saturação ( $F'$ ), fluorescência máxima após adaptação a luz saturante ( $F_m'$ ), taxa de transporte de elétrons (ETR), eficiência quântica do PSII (Y), extinção não fotoquímica de Stern-volmer

(NPQ), extinção não fotoquímica completa da fluorescência da clorofila (QCN), rendimento quântico de extinção fotoquímica não regulada (YNO) e regulada (YNPQ).

### 8.3 Parâmetros bioquímicos e variáveis de crescimento, aos 211 DAR

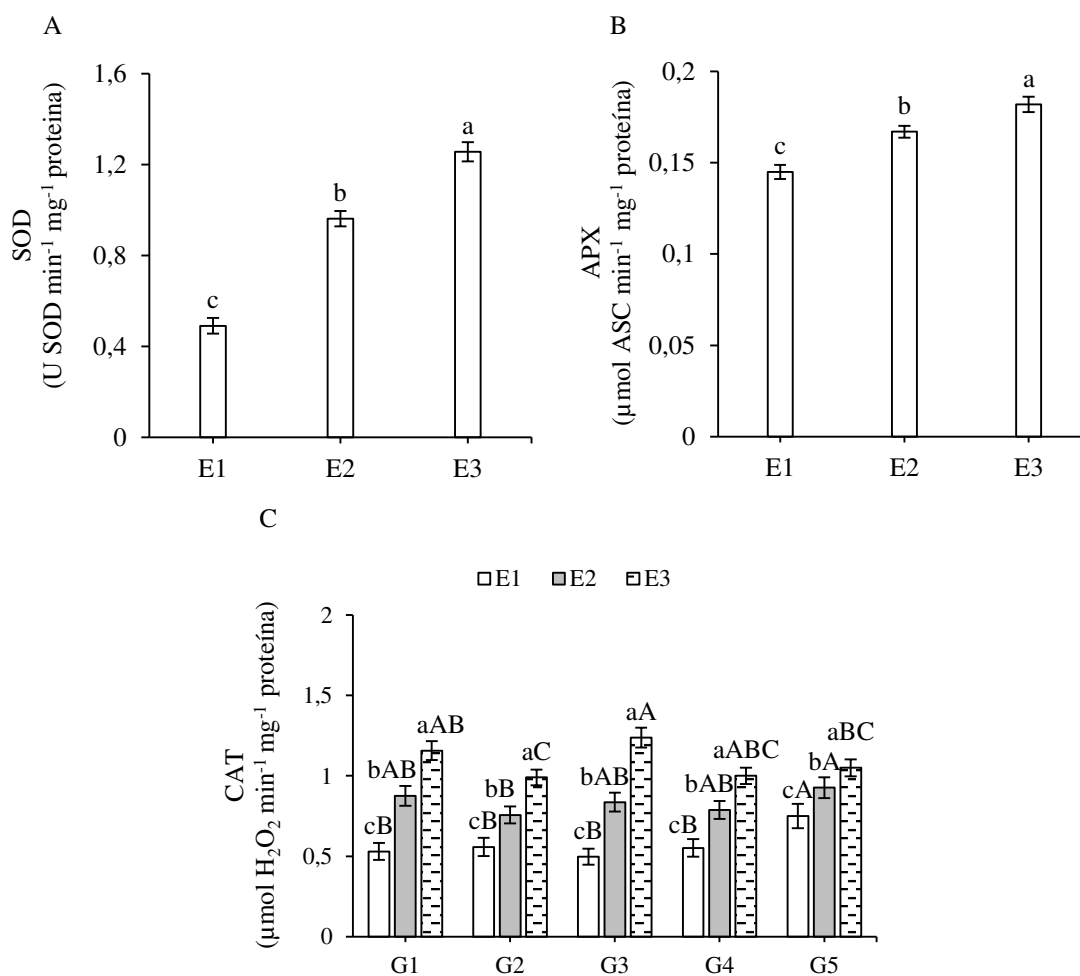
De acordo com teste F (Tabela 7), efeito significativo entre genótipos foi registrado sobre a atividade da catalase (CAT), prolina (PROL), clorofila *a* (Chl *a*), clorofila *b* (Chl *b*), carotenoides (Car), altura de planta (AP) e número de colmos (NC). Todavia, para as estratégias de manejo diferenças significativas sobre todos os parâmetros bioquímicos e variáveis de crescimento foram observadas. Considerando ser mais importante discutir o efeito da interação quando significativa, destaque é dado a interação G x E sobre CAT, AP e NC.

**Tabela 7.** Teste F para parâmetros bioquímicos e variáveis de crescimento de cinco genótipos de cana-açúcar submetidos a três estratégias de manejo, aos 211 DAR.

F. Variação	Teste F						
	SOD <sup>1</sup>	CAT	APX <sup>1</sup>	PROL <sup>1</sup>	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Car
Genótipos (G)	ns	**	ns	**	**	**	**
Estratégias (E)	**	**	**	**	**	**	**
G x E	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
Bloco	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	7,33	11,04	7,35	11,76	18,50	17,91	13,83
	AP	NC	DC	NF	AF <sup>1</sup>		
Genótipos (G)	**	**	ns	ns	ns		
Estratégias (E)	**	**	**	**	**		
G x E	*	**	ns	ns	ns		
Bloco	ns	ns	ns	ns	ns		
CV (%)	5,82	6,53	4,45	12,50	9,45		

CV- Coeficiente de variação; \*\* e \* - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente. ns - não significativo. <sup>1</sup>Dados Transformados em  $\sqrt{x}$ . SOD- superóxido dismutase; CAT- catalase; APX- ascorbato peroxidase; PROL- teor de prolina; Chl *a*- clorofila *a*; Chl *b*- clorofila *b*; Car- carotenoides; AP- altura de plantas; NC- número de colmos; DC- diâmetro de colmo; NF- número de folhas e AF- área foliar.

Para evitar ou minimizar os danos oxidativos causado pela deficiência hídrica, as plantas têm um complexo sistema antioxidativo de defesa, capazes de neutralizar a toxicidade das espécies reativas de oxigênio das células vegetais (ERO's) (Hasanuzzaman et al., 2020). Em geral, elas eliminam as ERO's pela ação da SOD, CAT, APX, e outras enzimas envolvidas no mecanismo de desintoxicação celular (Barbosa et al., 2021). No estudo aqui apresentado, houve aumento na SOD (156,0%) e APX (25,5%) nas plantas submetidas a déficit hídrico, em relação as plantas sob irrigação plena (E1), todavia, com a suplementação de piruvato, a SOD e a APX tiveram imput de 95,9 e 15,2%, respectivamente, em relação a E1 (Figura 18A e B).



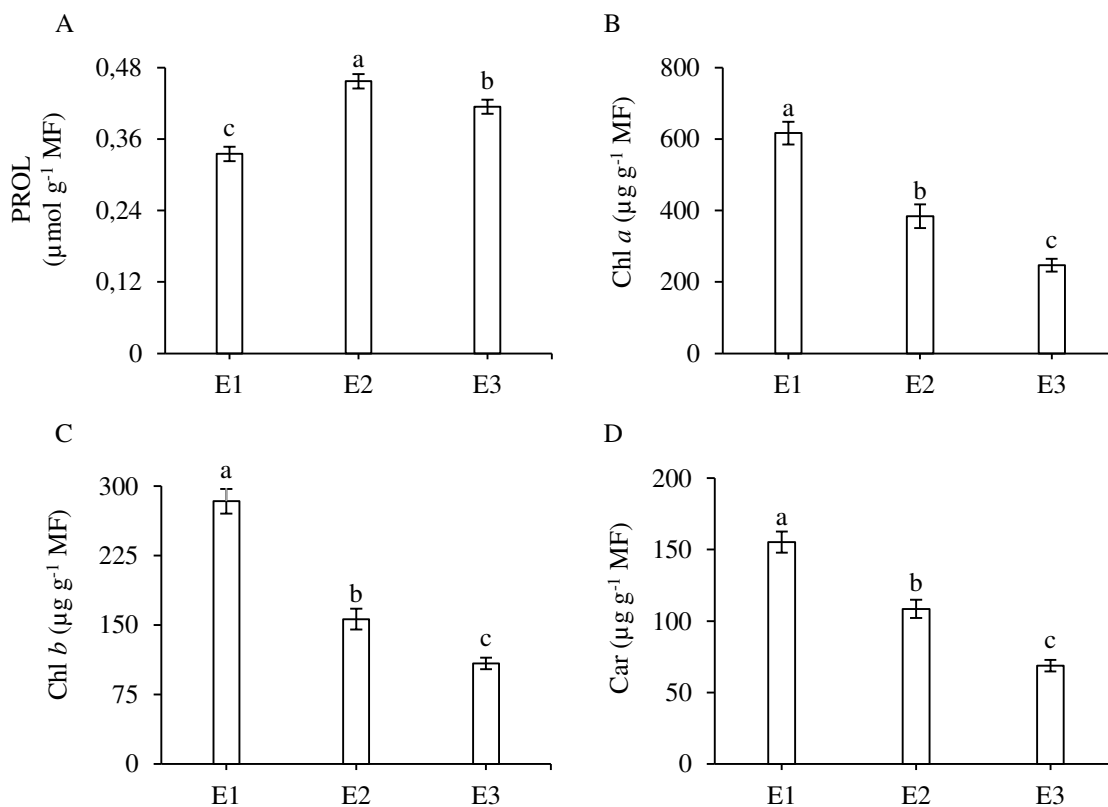
**Figura 18.** Atividade das enzimas superóxido dismutase - SOD (A), ascorbato peroxidase - APX (B) em função das estratégias de manejo. Desdobramento da interação para a atividade da catalase - CAT (C) em função dos genótipos e das estratégias de manejo ( $G \times E$ ), aos 211 DAR. Letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre as estratégias de manejo e letras maiúsculas são indicativos de não haver diferença entre genótipos pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico. G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443.

Em relação a atividade da enzima catalase (Figura 18C), houve aumento de 118,3% (G1- RB863129), 77,4% (G2- RB92579), 148,8% (G3- RB962962), 81,1% (G4- RB021754) e 40,0% (G5- RB041443) em plantas sob déficit hídrico (E3) em relação às plantas controle (E1). Todavia, a atividade dessa enzima foi influenciada pela suplementação de piruvato em todos os genótipos quando submetidos ao déficit hídrico, com reduções de 24,4% (G1- RB863129), 23,5% (G2- RB92579), 32,4% (G3- RB962962), 21,2% (G4- RB021754) e 11,7% (G5- RB041443), em relação as plantas sob déficit hídrico (E3).

A menor atividade da SOD, CAT e APX quando da suplementação com piruvato (E2) em relação as plantas sob déficit hídrico (E3), ocorreu, possivelmente, em virtude do piruvato

ter aliviado os efeitos deletérios do déficit hídrico, com redução na produção de ERO's e por conseguinte, menor ação da maquinaria oxidativa para produção de enzimas. Apesar do piruvato possuir funções pouco conhecidas quando aplicado de forma exógena na planta, o aumento na atividade da SOD pode estar relacionado ao aumento do estresse oxidativo gerado pela limitação de água, o qual se torna crítico para as plantas. Com a suplementação de piruvato houve contribuição na SOD, que dismuta os radicais superóxido logo no início do processo antioxidante, promovida pela eficiência na atividade de CAT e finalizada pela ação APX, degradando o  $H_2O_2$  em  $H_2O$  e  $O_2$ . Este maquinário opera integralmente, visando minimizar o efeito das ERO's gerado a partir do estresse hídrico nas células.

Em relação ao teor de prolina livre (PROL), constatou-se aumento de 36,4 e 23,5% quando as plantas foram submetidas as estratégias E2 e E3, respectivamente, em relação a E1 (Figura 19A). Além disso, quando as plantas receberam aplicação de piruvato (E2) obtiveram aumento de 9,4%, diferindo estatisticamente das plantas que não receberam piruvato (E3).



**Figura 19.** Teor de prolina - PROL (A), clorofila *a* - Chl *a* (B), clorofila *b* - Chl *b* (C) e carotenoides - Car (D) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 211 DAR. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre estratégias de manejo pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico.

Embora a concentração de prolina em plantas sob déficit hídrico gere muitas discussões sobre o seu papel, é bastante relatado que seu acúmulo com o estresse é benéfico às plantas, pois tem sido associado de forma eficiente ao aumento da tolerância ao estresse hídrico. Os resultados encontrados na estratégia E3 condizem com os resultados de Abbas et al. (2014) e Hemaprabha et al. (2013) em cana-de-açúcar, em que a concentração de prolina foi maior em plantas submetidas ao déficit hídrico, quando comparado com as plantas sob irrigação plena. Resultados semelhantes também foram observados em milho (Anjum et al., 2017), arroz (Urmi et al., 2023) e trigo (Parveen et al., 2021), que encontraram aumento no teor de prolina com a imposição do estresse hídrico.

De acordo com Hosseinifard et al. (2022), o acúmulo desse osmorregulador além de proteger as células das plantas contra o estresse, é eficiente em eliminar as espécies reativas de oxigênio. A suplementação com piruvato em plantas sob déficit hídrico (E2) aumentou significativamente o teor de prolina, que refletiu na redução de danos oxidativo e aumentou a taxa de transporte de elétrons e eficiência quântica do PSII, melhorando atividade fisiológica da planta. Pois, segundo Hemaprabha et al. (2013), ao término do período de estresse, o teor de prolina acumulada pela planta pode ser utilizado como fonte de energia para a recuperação da atividade fisiológica das plantas.

Tais resultados condizem com os encontrados por Parveen et al. (2021), pois, a aplicação de ácido salicílico aumentou o acúmulo de prolina em plantas de trigo cultivadas sob estresse hídrico, regulando positivamente o sistema de defesa antioxidante e reduzindo o dano oxidativo causado pelas ERO's. Em estudo conduzido por Urmi et al. (2020), ao avaliarem o efeito combinado de ácido salicílico e prolina em plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) sob estresse hídrico, constataram que a aplicação de ácido salicílico e/ou prolina aumentou significativamente o teor de prolina em relação as plantas que não receberam aplicação.

O aumento no teor de prolina favoreceu a síntese de pigmentos fotossintéticos sob condições de déficit hídrico quando as plantas receberam suplementação de piruvato (Figura 19). Os efeitos benéficos da suplementação de piruvato sobre os pigmentos de clorofila podem ser atribuídos também, a maior disponibilidade de moléculas energéticas a planta e na atividade da RuBisCo e, em última análise, ao aumento da taxa fotossintética. Possivelmente, mais moléculas de piruvato estavam disponíveis, reforçando o substrato energético para a produção de ATP. Além disso, com essa suplementação, parte da energia que seria gasta na glicólise para a produção de ácido pirúvico possivelmente foi utilizada na síntese de pigmentos fotossintéticos.



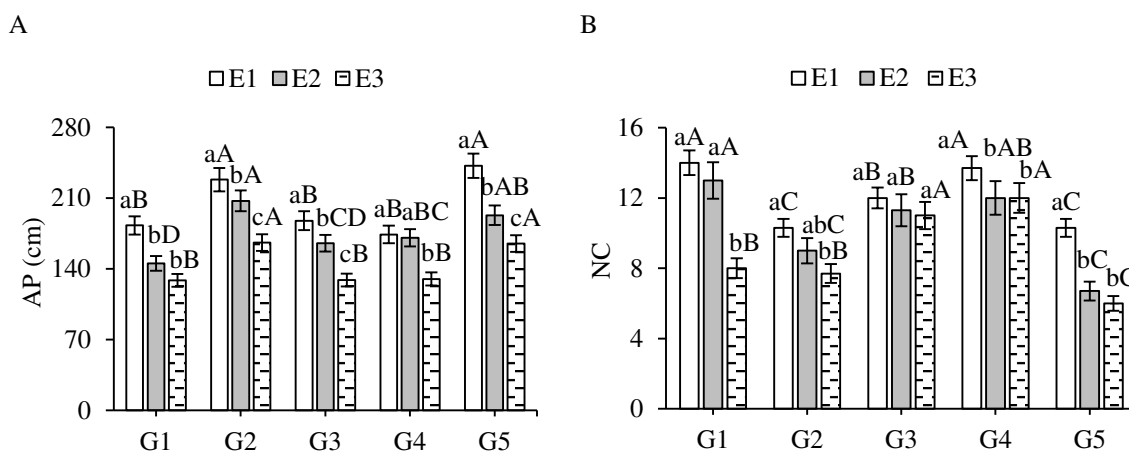
Os pigmentos fotossintéticos têm papel fundamental no crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo responsáveis pela transmissão de energia luminosa para produção de fotoassimilados (Simkin et al., 2022). No presente trabalho, a suplementação de piruvato (E2) aumentou 55,4, 43,8 e 55,7% os teores de clorofila *a* (Figura 19B), *b* (Figura 19C) e carotenoides (Figura 19D), respectivamente, em comparação com a estratégia E3, expressando maior tolerância ao déficit hídrico através da manutenção dos pigmentos fotossintéticos. Quando cultivadas sob déficit hídrico (E3) foram significativamente reduzidos em comparação com as plantas sob irrigação plena (E1) (Figura 19B, C e D).

A degradação nos teores de clorofila *a* e *b*, e conseqüentemente de carotenoides, pode ser devida à biossíntese reduzida da clorofila, decorrente de perturbações fotoquímicas ocasionadas pelo excesso de luminosidade nos centros de reação do PSII (Verma et al., 2022). Segundo Spinoso-Castillo et al. (2023), os carotenoides são antioxidantes não enzimáticos essenciais na eliminação de ERO's. Assim, possivelmente, o baixo teor de carotenoides contribuiu para a redução na atividade fotossintética, durante o período de déficit hídrico, aumentando a fotodegradação, que resultou em baixa Fv/Fm. Souza et al. (2020) também verificaram reduções nos níveis de emissão de fluorescência e teores de pigmentos fotossintéticos em RB855536 e RB93509 submetidos à restrição hídrica.

Além da cana-de-açúcar, também há relatos na literatura sobre a degradação dos pigmentos fotossintéticos em diversas culturas sob déficit hídrico, como em trigo (Hnilicka et al., 2023), sorgo (Stefanov et al., 2023) e milho (Stefanov et al., 2023; Yousaf et al., 2023). Apesar das pesquisas se concentrarem apenas nos efeitos deletérios do déficit hídrico, há comprovação que substâncias provenientes de produtos orgânicos, podem minorar os efeitos deletérios da seca, elevando a capacidade das plantas a se ajustarem a tais condições. Por exemplo, no estudo de Verma et al. (2021b) a aplicação de silício via foliar, além de minorar os efeitos nocivos do déficit hídrico em cana-de-açúcar, melhora o sistema de defesa antioxidante das plantas, pois, favorece a síntese de pigmentos fotossintéticos e a eficiência quântica máxima do fotossistema II. Maia Júnior et al. (2020) verificaram, também, em plantas de cana-de-açúcar, que a aplicação foliar de glicina betaína mitiga os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre a eficiência quântica máxima do PSII.

O déficit hídrico reduziu a altura de planta de todos os genótipos em relação a irrigação plena. No entanto, G2 (RB92579) e G4 (RB021754) foram menos afetados, com reduções de 27,3 e 23,8%, respectivamente, enquanto G1 (RB863129); G3 (RB962962) e G5 (RB041443) reduziram 29,7, 31,3 e 31,8%, respectivamente. Todavia, ao ser aplicado piruvato, constatou-se alívio do déficit hídrico na maioria dos genótipos, exceto para G1 (RB863129) (Figura 20A).

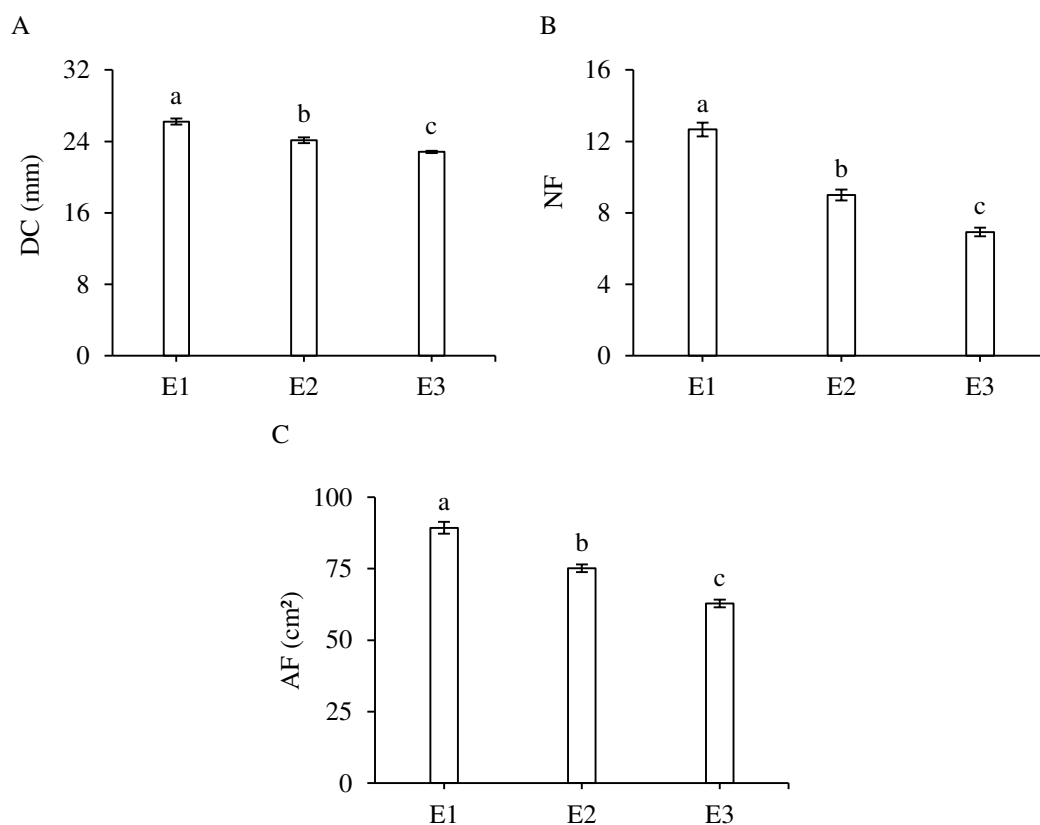
Os aumentos referentes à E2 foram 24,9% (RB92579), 28,1% (RB962962), 31,3% (RB021754) e 16,9% (RB041443), quando comparado as plantas sob a estratégia E3 (Figura 20A).



**Figura 20.** Desdobramento da interação para altura de plantas – AP (A) e número de colmos - NC (B) de cana-de-açúcar em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 211 DAR. Letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre as estratégias de manejo e letras maiúsculas são indicativos de não haver diferença entre genótipos pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico. G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443.

A restrição hídrica não afetou o número de colmos em G3 (RB962962), sendo observado diferença significativa entre as estratégias, indicando assim, maior tolerância desse genótipo a deficiência de água no solo (Figura 20B). Por outro lado, o G1 (RB863129) e G5 (RB041443) tiveram reduções consideráveis na ordem de 42,0 e 41,0%, respectivamente, em relação a irrigação plena (E1). É importante ressaltar que nesse tratamento a umidade do solo nesses genótipos estava a um potencial matricial de - 304,8 e - 214,8 kPa, respetivamente (Tabela 4). Quando o teor de água do solo está próximo ao ponto de murcha, as plantas envidam esforços significativos para preservar a água, o que pode levar ao aumento da temperatura das folhas (Carmo-Silva et al., 2012) devido à redução da capacidade evaporativa, que também tem a função de resfriamento do dossel. Com isso, a atividade metabólica da planta é afetada, refletindo no crescimento.

Ao analisar o efeito isolado das estratégias de manejo, verifica-se que o déficit hídrico reduziu o DC (12,9%), NF (45,3%) e AF (29,6%), em relação a irrigação plena (E1). Todavia, quando as plantas receberam aplicação de piruvato (E2) as reduções foram 7,9% (DC), 28,9% (NF) e 15,8% na AF (Figuras 21A, B, C e D).



**Figura 21.** Diâmetro do colmo - DC (A), número de folhas - NF (B) e área foliar - AF (C) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 211 DAR. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre estratégias de manejo pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico.

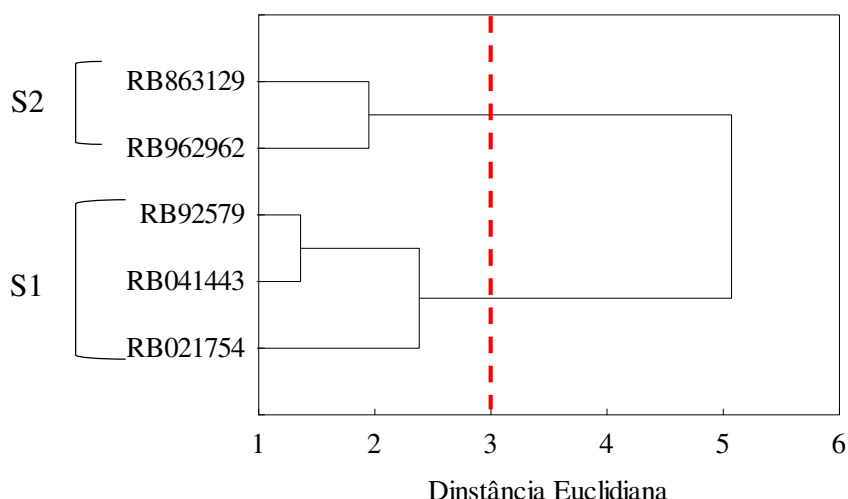
O número de folhas é uma variável muito contributiva na análise de crescimento da cana-de-açúcar, pois interfere diretamente na produção final da cultura, visto que, a abscisão de folhas e a redução da área foliar reduzem a absorção de radiação solar, com prejuízos no processo fotossintético (Taiz et al., 2017). A redução no número de folhas é considerada como uma estratégia adaptativa para a sobrevivência da cultura, pois diminui o gasto metabólico para a manutenção da turgescência dos tecidos e permite direcionar assimilados para manter o crescimento da raiz, visando a absorção de água (Inman-Bamber; Smith, 2005).

No cultivo de cana-de-açúcar, em geral, o estresse hídrico é prejudicial durante as fases de perfilhamento e alongamento do colmo (Hoang et al., 2019). Nessas fases, a disponibilidade hídrica tem papel fundamental na pressão de turgor das células e na translocação de fotoassimilados nos órgãos da planta. Sob déficit hídrico, menor a síntese e acumulação de fotoassimilados, dessa forma, a divisão e expansão celular serão prejudicados, resultando na redução do crescimento e desenvolvimento (Hoang et al., 2019; Dinh et al., 2020). Em pesquisa desenvolvida por Endres et al. (2018) com seis genótipos de cana-de-açúcar (RB855113,

RB92579, RB867515, RB72454 e RB855536) submetidos ao déficit hídrico, na fase de alongamento do colmo, o déficit hídrico reduziu a altura de plantas de RB855113 (54%) e SP79-1011 (34,8%), a largura foliar em RB72454 (29,2%) e RB92579 (25,1%) e o comprimento da folha em RB855536 (27,0%) e SP79-1011 (29,7%).

Os efeitos do déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar também foram evidenciados por Maia Júnior et al. (2018), ao avaliarem três condições hídricas (80-100, 40-60 e 0-20% da água disponível de água no solo), verificaram reduções na altura de plantas (38,0%), diâmetro do colmo (13,0%) e área foliar (44,2%), quando aplicado o estresse severo (0-20%). Com a inibição da expansão foliar, a área foliar, torna-se menor e a planta transpira menos, conservando a água do solo por um período mais longo. No entanto, ao diminuir a área foliar, ocorre redução na absorção de radiação solar, com prejuízos no processo fotossintético, na capacidade de acumulação de sacarose e no rendimento agrícola.

Corroborando com os dados univariados, foi realizada análise multivariada dos dados através das análises de agrupamento (Cluster Analysis) e de componentes principais (ACP). O dendrograma referente à análise de agrupamento dos genótipos em função dos parâmetros bioquímicos (Catalase, prolina, clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides) e das variáveis de crescimento (Altura de planta e número de colmo) da cana-de-açúcar é apresentado na Figura 22. Ao empregar a distância euclidiana como critério de agrupamento e fixar um ponto de corte em 3, observou-se a distribuição dos 5 genótipos em 2 subgrupos (S), em que, o subgrupo 1 foi formado por RB021754, RB041443, RB92579 e o subgrupo 2 por RB962962 e RB863129.



**Figura 22.** Dendrograma da análise de agrupamento (Cluster Analysis) de genótipos de cana-de-açúcar e formação de subgrupos com similaridade dentro do subgrupo e dissimilaridade entre os subgrupos.

Os genótipos RB021754, RB041443 e RB92579 se agruparam por terem obtido maiores teores de prolina (PROL), clorofila a (Chl *a*), clorofila b (Chl *b*) e carotenoides (Car), bem como maiores valores de altura de plantas (AP) e número de colmos (NC). Tais resultados, condizem com a natureza genética desses materiais, pois foram desenvolvidos para expressar alto potencial produtivo (Ridesa, 2021).

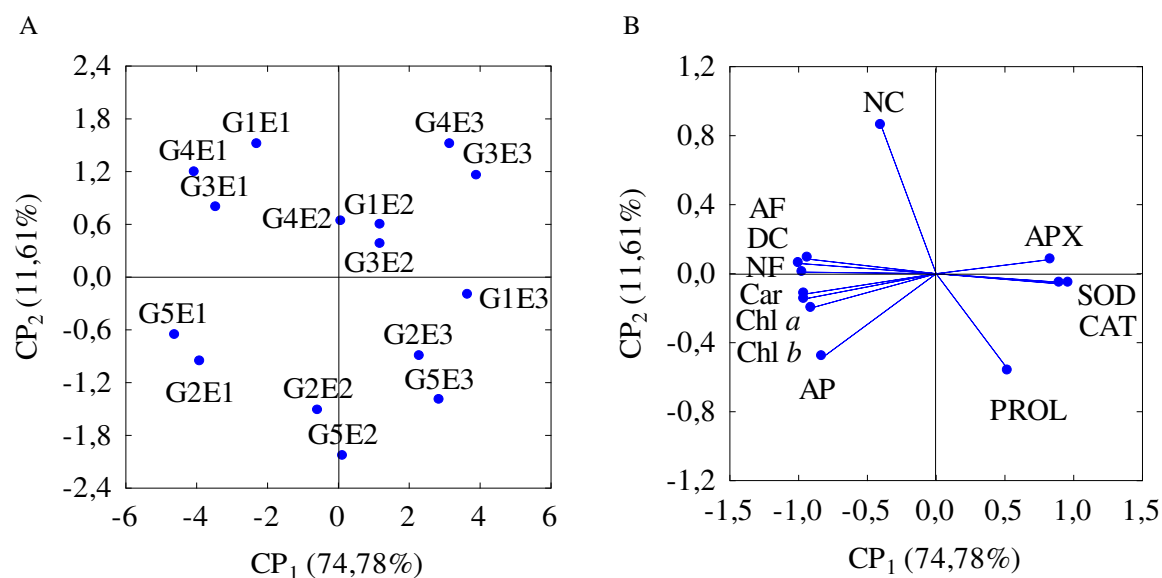
As variáveis originais foram condensadas em duas dimensões (CP<sub>1</sub> e CP<sub>2</sub>) que representam 86,3% da variância total. O CP<sub>1</sub> responde por 74,78% da variância, formados a partir da combinação linear entre SOD (*r* = 0,97), CAT (*r* = 0,91), APX (*r* = 0,84), que contrastaram com Chl *a* (*r* = - 0,95), Chl *b* (*r* = - 0,89), Car (*r* = - 0,95), AP (*r* = - 0,82), DC (*r* = - 0,93), NF (*r* = - 0,97) e AF (*r* = - 0,99). O CP<sub>2</sub> representa 11,6% da variância restante, formado por PROL (*r* = - 0,57) e NC (*r* = 0,86) (Tabela 8).

**Tabela 8.** Autovalores, porcentagem de variância total explicada e coeficientes de correlações (*r*) entre as variáveis originais e os componentes principais, aos 211 DAR.

	Componentes principais (CP)											
	CP <sub>1</sub>						CP <sub>2</sub>					
Autovalores ( $\lambda$ )	8,97						1,39					
Porcentagem de variância total (S <sup>2</sup> %)	74,78						11,61					
CPs	Coeficientes de correlação ( <i>r</i> )											
	SOD	CAT	APX	PROL	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Car	AP	NC	DC	NF	AF
CP <sub>1</sub>	0,97*	0,91*	0,84*	0,53	- 0,95*	- 0,89*	- 0,95*	- 0,82*	- 0,40	- 0,93*	- 0,97*	- 0,99*
CP <sub>2</sub>	- 0,05	- 0,06	0,08	- 0,57*	- 0,15	- 0,19	- 0,12	- 0,48	0,86*	0,08	- 0,01	0,06

SOD- superóxido dismutase; CAT- catalase; APX- ascorbato peroxidase; PROL- teor de prolina; Chl *a*- clorofila a; Chl *b*- clorofila b; Car- carotenoides; AP- altura de plantas; NC- número de colmos; DC- diâmetro de colmo; NF- número de folhas e AF- área foliar. \*Variáveis consideradas *r* = 0,10 - 0,39 (fraco), 0,40 - 0,69 (moderado) e 0,70 - 1,00 (forte).

O posicionamento dos tratamentos em relação à CP<sub>1</sub> e CP<sub>2</sub> (Figura 23A), reflete a contribuição individual de cada variável para definição do valor de cada componente. Os tratamentos que ocupam a mesma posição no plano CP<sub>1</sub> x CP<sub>2</sub>, são influenciados, sobretudo, pelas variáveis que ocupam as mesmas posições ou posições opostas no plano de círculo das correlações (Figura 23B). Assim, o CP<sub>1</sub> é basicamente um contraste entre os parâmetros descritores da bioquímica e do crescimento da cana-de-açúcar. Os tratamentos no quais o déficit hídrico foi a característica preponderante (valores mais altos de SOD, CAT e APX) foram posicionados a direita do CP<sub>1</sub> e os tratamentos sem déficit hídrico, as variáveis de AF, DC, NF, Car, Chl *a*, Chl *b* e AP foram posicionados a esquerda do CP<sub>1</sub> (Figura 23B). O CP<sub>2</sub> foi representado pelos teores de prolina e número de colmos.



**Figura 23.** Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores estudados (genótipos e estratégias de manejo) (A) e das variáveis bioquímicas e de crescimento da cana-de-açúcar (B) nos dois componentes principais (CP<sub>1</sub>) e (CP<sub>2</sub>). G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443. E1 - Irrigação plena, E2 - déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico. Superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), prolina (PROL), conteúdo de clorofila *a* (Chl *a*), clorofila *b* (Chl *b*) e carotenoides (Car), altura de plantas (AP), número de colmos (NC), diâmetro de colmos (DC) e número de folhas (NF) e área foliar (AF).

O modo de representação dos dados pela ACP permite comparar as estratégias de manejo dentro de cada genótipo estudado. O posicionamento dos tratamentos no CP<sub>1</sub> mostra que, os genótipos de cana-de-açúcar são pelo déficit hídrico, condição determinada pelos maiores valores obtidos na atividade da SOD, CAT e APX. Mas, cabe salientar que, esses parâmetros bioquímicos, normalmente, estão associados a maior produção de espécies reativas de oxigênio oriundas de condições de estresse na planta. Sendo assim, à medida que houve redução dos parâmetros bioquímicos em cada estratégia houve aumento nos teores de clorofila, carotenoides, bem como na altura de planta, área foliar e número de folhas.

#### 8.4 Componentes de produção e produtividade da água, aos 385 DAR

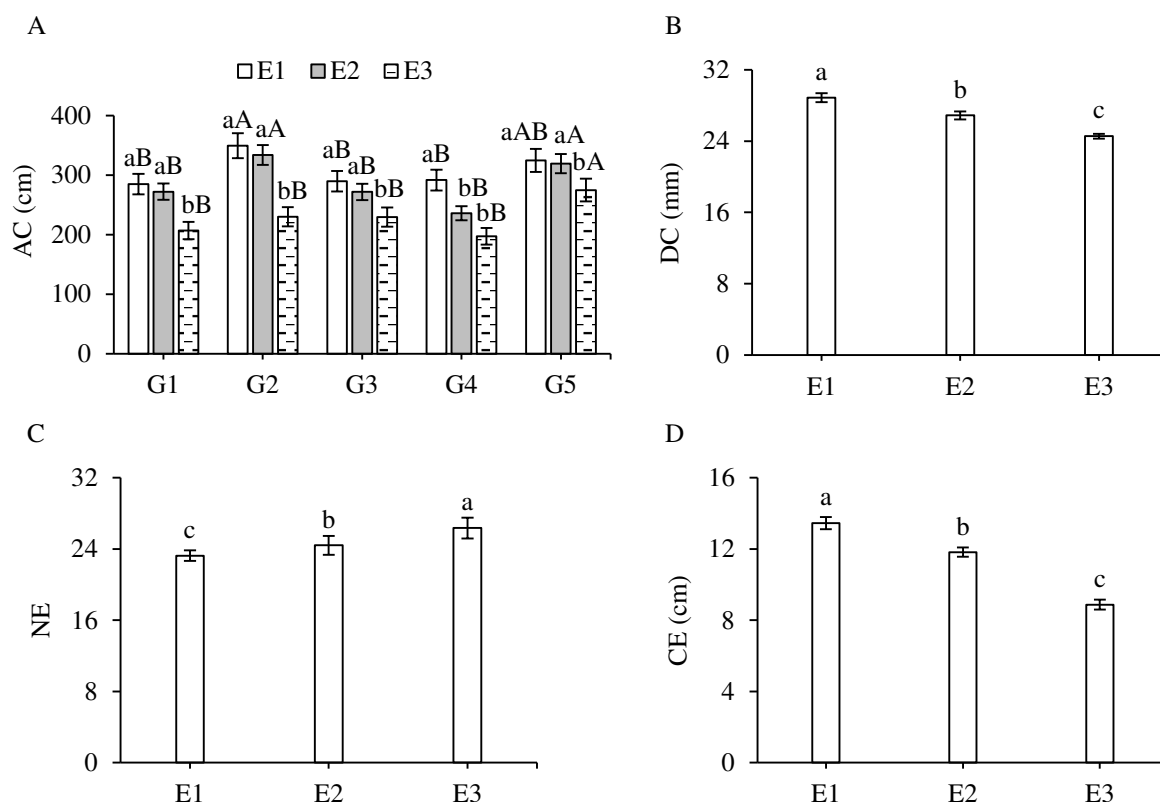
De acordo com o teste F (Tabela 9) houve efeito significativo ( $p \leq 0,01$ ) dos genótipos e das estratégias de manejo sobre altura do colmo (AC), diâmetro de colmos (DC), número de entrenós (NE), comprimento de entrenós (CE), massa de colmos (MC) e produtividade da água (Ya). Considerando ser mais importante discutir o efeito da interação, quando significativa, destaque é dado à interação G x E sobre AC, MC e Ya.

**Tabela 9.** Teste F para componentes de produção e produtividade da água de cinco genótipos de cana-açúcar submetidos a três estratégias de manejo, 385 DAR.

F. Variação	Teste F					
	AC	DC	NE	CE	MC	Ya
Genótipos (G)	**	**	**	**	**	**
Estratégias (E)	**	**	**	**	**	**
G x E	*	ns	ns	ns	**	*
Bloco	ns	ns	ns	ns	*	*
CV	7,03	4,53	6,39	8,92	3,83	3,94

CV- Coeficiente de variação; \*\* e \* - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente. ns - não significativo. <sup>1</sup>Dados Transformados em  $\sqrt{x}$ . AC- altura do colmo; DC- diâmetro de colmos; NE- número de entrenós; CE- comprimento de entrenós; MC- massa de colmos e Ya- produtividade da água.

A altura de colmo é um componente de extrema importância para determinar a produtividade da cana-de-açúcar. Neste estudo, com a imposição do déficit hídrico no perfilhamento e alongamento do colmo (E3), houve redução na altura de colmo de todos os genótipos estudados, porém, com maior intensidade em G2 (RB92579), correspondendo a 119,7 cm, quando comparado com a estratégia E1 (Figura 24A). As menores reduções na altura do colmo (60,4 cm e 49,9 cm) foram observadas no G3 (RB962962) e G5 (RB041443), respectivamente, o que pode indicar uma melhor flexibilidade genética desses materiais quando submetidos às condições de seca. É importante ressaltar que, em RB863129, RB92579, RB962962 e RB041443 a altura de colmo das plantas estressadas que receberam piruvato (E2), não diferiram das plantas controle (E1). Isso pode significar que, a aplicação de piruvato na época em que as plantas estavam sob déficit foi eficaz em aliviar os efeitos deletérios do estresse, permitindo a translocação dos fotoassimilados para o crescimento.



**Figura 24.** Altura do colmo - AC (A) de cana-de-açúcar em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 385 DAR. Diâmetro do colmo - DC (B), número de entrenós - NE (C) e comprimento de entrenós - CE (D) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 385 DAR. Letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre as estratégias de manejo e letras maiúsculas são indicativos de não haver diferença entre genótipos pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico. G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443.

Gomathi et al. (2020) também registraram redução na altura do colmo em estudo com oito clones de cana-de-açúcar (Co12007, Co12008, Co12009, Co12012, Co12019, Co12024, Co86032 e Co99004) sob déficit hídrico, em aproximadamente 37, 16 e 16,0% na fases de formação, alongamento e maturação, respectivamente; e Batista et al. (2015) ao avaliarem os efeitos do déficit hídrico no crescimento de quatro genótipos de cana-de-açúcar (RB92579, RB855453, RB867515 e RB928064) verificaram que o déficit hídrico reduziu 60% a altura de colmos em comparação as plantas controle.

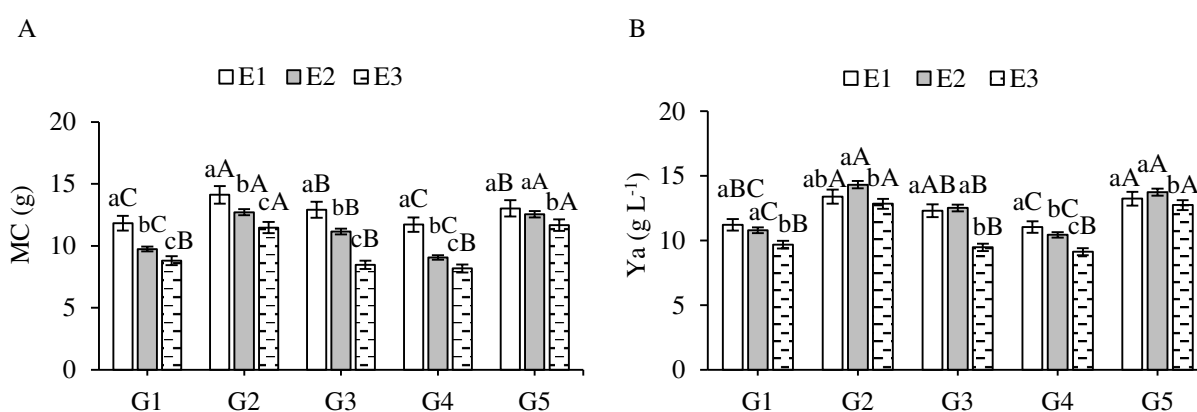
Ainda na Figura 24, observa-se redução no diâmetro do colmo (DC) e no comprimento de entrenós (CE) com a imposição do déficit hídrico. O DC reduziu de 28,87 mm nas plantas controles (E1) para 24,56 mm nas plantas sob déficit hídrico (E3) (Figura 24B). Para o CE a redução foi 4,58 mm quando comparado as plantas sob déficit hídrico (E3) em relação as plantas



sob irrigação plena (E1) (Figura 24D). Ao ser aplicado o piruvato, reduções no DC e CE foram amenizadas. A redução do comprimento de entrenós em plantas sob déficit hídrico, subsidiou aumento no número de entrenós (Figura 24C). No entanto, ao ser aplicado o piruvato houve aumento no comprimento de colmo e, conseqüentemente, redução no NE.

Ao contrário de outras culturas, a produtividade da cana-de-açúcar, está diretamente relacionado ao número de colmos, comprimento de colmos, número de entrenós, comprimento dos entrenós e diâmetro do colmo (Gomathi, et al., 2014). Os resultados estão de acordo com os obtidos por Maia Júnior et al. (2018), ao avaliarem três condições hídricas (80-100, 40-60 e 0-20% da água disponível no solo), verificaram com reduções na altura de plantas (38,0%), diâmetro do colmo (13%) e área foliar (44,2%), quando aplicado o estresse severo (0-20% da água disponível no solo); e Misra et al. (2020) ao avaliarem as alterações morfológicas em plantas de cana, constataram reduções na altura (18,2%), diâmetro do colmo (7,3%), número de entrenós (43,5%) e comprimento internodal (39,0%) em plantas sob condições de seca.

O déficit hídrico também influenciou de forma negativa a massa de colmo (Figura 25A) e a produtividade da água (Figura 25B) em todos os genótipos de cana-de-açúcar. Todavia, o genótipo RB962962 foi mais sensível ao déficit hídrico, com reduções de 4,45 g na massa de colmo e 3,04 g L<sup>-1</sup> na produtividade da água, em comparação as plantas sob irrigação plena (E1). Ao ser aplicado o piruvato, as reduções foram mais brandas, reduzindo apenas 1,76 g na MC em relação a irrigação plena (E1), enquanto para a produtividade da água não houve diferença entre E1 e E2.

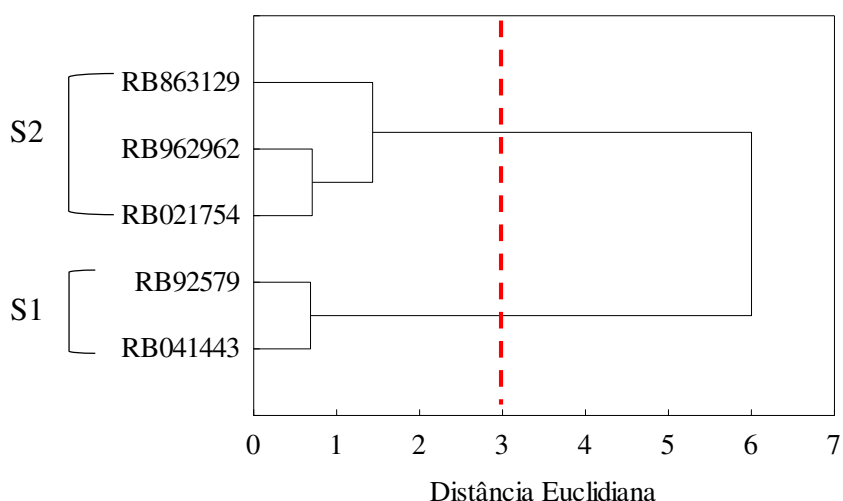


**Figura 25.** Desdobramento da interação para massa de colmos (MC) e produtividade da água (Ya) de cana-de-açúcar em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 385 DAR. Letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre as estratégias de manejo e letras maiúsculas são indicativos de não haver diferença entre genótipos pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05). As barras verticais representam o erro padrão da média (n = 3). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico. G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443.

Os resultados encontrados para MC se assemelham aos de Misra et al. (2020) e Gomathi et al. (2020), notaram o déficit hídrico reduziu 21,3 e 23,5%, respectivamente. Tais informações corroboram com os resultados obtidos nesse estudo, em que a redução da taxa fotossintética afetou o desenvolvimento dos colmos. Essa redução pode estar associada a menor acumulação de açúcares nas células, pois, durante o déficit hídrico a produção de fotoassimilados é limitada, com isso, as reservas de açúcares armazenados são metabolizadas para manter o funcionamento das células e, portanto, redução do número de colmos e formação de internódios menores, com isso, menor massa dos colmos (Inman-Bamber, 2004; Chaves et al., 2009; Dinh et al., 2020).

Em áreas em que a água é fator limitante, como na região semiárida, é mais rentável economicamente para o produtor maximizar a produtividade da água do que aumentar a produtividade da cultura (Geerts; Raes, 2009). Portanto, as plantas cultivadas com suplementação de piruvato pode ser uma alternativa viável ao produtor, pois, os dados da pesquisa apontam para os efeitos benéficos da aplicação desse produto sobre a Ya, provavelmente, isso ocorreu em função do fechamento estomático como mecanismo de defesa, pois com a redução da gs ocorre redução na E, o que pode contribuir para menor perda de água da falha para a atmosfera. Consistente a essas observações, Dias et al. (2022), ao avaliarem a suplantação de piruvato em plantas de algodão sob restrição hídrica variando as fases fenológicas, verificaram aumento a produtividade da água.

Ao realizar análise de Cluster para identificar a relação entre os genótipos observou-se formação de dois subgrupos, em que o subgrupo 1 foi formado pelos genótipos RB041443, RB92579 e o subgrupo 2 por RB021774, RB962962 e RB863129 (Figura 26). A separação desses subgrupos demonstra que em termos de produção, os genótipos RB041443 e RB92579 são similares entre si, porém apresenta dissimilaridade em relação aos demais genótipos. O corte realizado na distância Euclidiana 3 possibilitou a divisão dos genótipos em subgrupos.



**Figura 26.** Dendrograma da análise de agrupamento (Cluster Analysis) de genótipos de cana-de-açúcar e formação de subgrupos com similaridade dentro do subgrupo e dissimilaridade entre os subgrupos.

Na análise de componentes principais, os dois primeiros permitiram explicar 93,6% da variância contida nas variáveis originais (Tabela 10). O CP<sub>1</sub> contribuiu com 64,3% da variância total e foi composto pela combinação linear entre a altura de colmo (- 0,97), massa de colmo (- 0,96), diâmetro do colmo (- 0,89) e produtividade da água (- 0,89). Enquanto o CP<sub>2</sub> contribuiu com 29,2% da variância remanescente e foi composto pelo número de entrenós (0,91) e comprimento de entrenós (- 0,85).

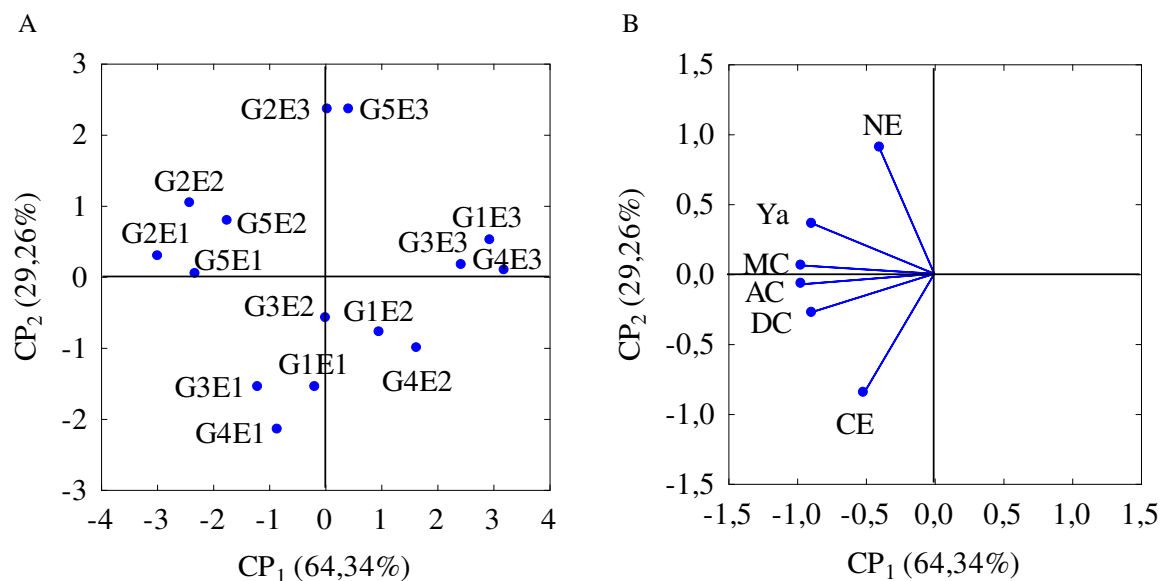
**Tabela 10.** Autovalores, porcentagem de variância total explicada e coeficiente de correlações (r) entre as variáveis originais e os componentes principais, aos 385 DAR.

	Componentes principais (CP)					
	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>				
Autovalores ( $\lambda$ )	3,86	1,76				
Porcentagem de variância total (S <sup>2</sup> %)	64,34	29,26				
CPs	Coeficientes de correlação (r)					
	AC	DC	NE	CE	MC	Ya
CP <sub>1</sub>	- 0,97*	- 0,89*	- 0,04	- 0,51	- 0,96*	- 0,89*
CP <sub>2</sub>	- 0,08	- 0,27	0,91*	- 0,85*	0,06	0,36

AC- altura do colmo; DC- diâmetro de colmos; NE- número de entrenós; CE- comprimento de entrenós; MC- massa de colmos e Ya- produtividade da água. \*Variáveis consideradas r = 0,10 - 0,39 (fraco), 0,40 - 0,69 (moderado) e 0,70 - 1,00 (forte).

As projeções bidimensionais dos efeitos dos tratamentos e das variáveis sobre o primeiro e segundo componente principais (CP<sub>1</sub> e CP<sub>2</sub>) estão representados na Figura 27A e B. Os dois componentes principais construídos a partir das informações originais retratam com precisão as características responsáveis pelas diferenças entre os tratamentos.

No CP<sub>1</sub>, as maiores médias de produtividade da água (Ya) foram observadas em G2E2 e G5E2, enquanto para MC, AC, DC em G2E1. Em contrapartida os menores valores desses componentes foram observados em G1E3 e G4E3. No componente 2, à medida que houve aumento no número de entrenós constatou-se encurtamento do entrenó. Os colmos com maiores números de entrenós foram obtidos com G5E3 e G2E3, todavia, colmos com entrenós mais compridos em G3E1 e G4E1.



**Figura 27.** Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores estudados (genótipos e estratégias de manejo) (A) e dos componentes de produção da cana-de-açúcar (B) nos dois componentes principais (CP<sub>1</sub>) e (CP<sub>2</sub>). G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443. E1 - Irrigação plena, E2 - déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico. Altura de colmos (AC), diâmetro do colmo (DC), número de entrenós (NE), comprimento de entrenós (CE), massa de colmos (MC) e produtividade da água (Ya).

### 8.5 Qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar, aos 385 DAR

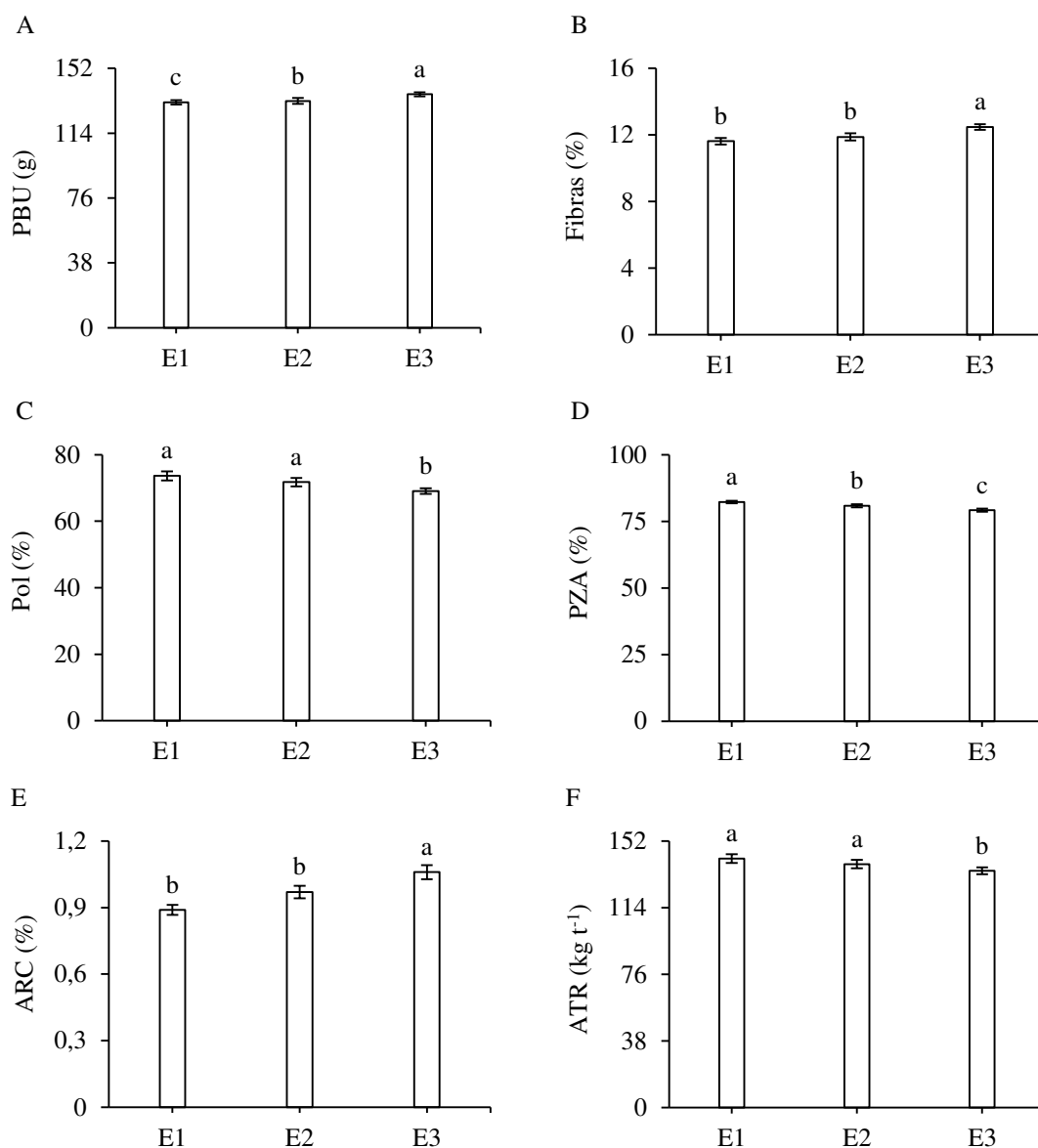
Pelo teste F (Tabela 11), constatou-se efeito significativo ( $p \leq 0,01$ ) dos genótipos e das estratégias de manejo da irrigação sobre peso do bolo úmido (PBU), sacarose polarizada (Pol), teor de sólidos solúveis (SS), teor de sacarose aparente do caldo (Polc), pureza (PZA), Pol da cana corrigida (PCC), teor de fibras (Fibras), porcentagem de açúcares redutores na cana (ARC) e açúcares totais recuperáveis (ATR). A interação G x E foi significativa para teor de sacarose aparente do caldo (Polc), Pol da cana corrigida (PCC) e teor de fibras (Fibras).

**Tabela 11.** Teste F para atributos de qualidade agroindustrial de cinco genótipos de cana-açúcar submetidos a três estratégias de manejo, aos 385 DAR.

F. Variação	Teste F								
	PBU	Pol	SS	Polc	PZA	PCC	Fibras	ARC	ATR
Genótipos (G)	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Estratégias (E)	**	**	**	**	**	**	**	**	**
G x E	ns	ns	**	**	ns	**	ns	Ns	ns
Bloco	**	ns	ns	ns	ns	**	**	*	ns
CV	2,66	3,22	1,78	1,84	1,43	2,02	5,34	4,23	2,01

CV- Coeficiente de variação; \*\* e \* - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente. ns - não significativo. PBU- Peso do bolo úmido; Pol- sacarose polarizada; SS- teor de sólidos solúveis; Polc- teor de sacarose aparente do caldo; PZA- pureza; PCC- pol da cana corrigida; Fibras- teor de fibras; ARC- porcentagem de açúcares redutores na cana e ATR- açúcares totais recuperáveis.

De acordo com Figura 28, as plantas de cana sob déficit hídrico (E3) obtiveram menores valores de Pol (69,1%), PZA (79,1%) e ATR (135,04 kg t<sup>-1</sup>), conseqüentemente, maiores valores para PBU (136,76 g), Fibras (12,5%) e ARC (1,1%), em relação ao tratamento irrigação plena (E1), que teve valores de Pol (73,6%), PZA (82,2%), Fibras (11,6%), ARC (0,89) e ATR (142,03 kg t<sup>-1</sup>). Ao comparar E3 com E1, nota-se redução em Pol (6,2%), PZA (3,8%) e ATR (4,9%), logo, aumento no peso do bolo úmido (3,6%), teor de fibras (7,3%) e porcentagem de açúcares redutores na cana (20,5%).



**Figura 28.** Peso do bolo úmido - PBU (A), teor de fibras - Fibras (B), sacarose polarizada - Pol (C), pureza - PZA (D), açúcares redutores na cana - ARC (E) e açúcares totais recuperáveis - ATR (F) de cana-açúcar em função das estratégias de manejo, aos 385 DAR. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre estratégias pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico.

As reduções na Pol, PZA e ATR podem estar relacionadas ao estresse hídrico, pois, reduz a atividade das enzimas do metabolismo de carboidratos e interferência na partição dos fotoassimilados para os diferentes órgãos da planta (Venkataramana et al., 1986). Assim, ocorre diminuição no conteúdo de sacarose, formação dos colmos e nos atributos de qualidade industrial dos colmos (Begum et al., 2012; Marin et al., 2009).

Reduções nesses atributos devido ao estresse hídrico também foram observadas por Wiedenfeld (2000) ao submeterem as plantas a seis semanas de estresse hídrico na fase de

alongamento do colmo, constatando redução no teor de sacarose (4,7%) e rendimento da cana (19,1%). Da mesma forma que Begum et al. (2012), ao avaliarem os efeitos do déficit hídrico sobre a qualidade do caldo de seis genótipos de cana, constataram que o ATR, SS e Pol também foram reduzidos em todos os genótipos. Consistentes a esses estudos, Endres et al. (2018) ao estudarem os efeitos do déficit hídrico em diferentes fenofases de 6 genótipos de cana (SP79-1011, RB855113, RB92579, RB867515, RB72454 e RB855536), verificaram redução no teor de sólidos solúveis (31,6%) e ATR (2,8%), em relação às plantas cultivadas sob irrigação.

Nessa pesquisa constatou-se efeito benéfico da suplementação de piruvato em plantas de cana cultivadas sob déficit hídrico (E2), com valores de Fibras (11,9%), Pol (71,7%), PZA (80,8%) e ATR (138,83 kg t<sup>-1</sup>), diferindo estatisticamente das plantas que não receberam piruvato. Com aumento de 3,9% (Pol), 2,1% (PZA), e 2,8% no ATR; e redução no PBU (2,8%), teor de fibras (4,9%) e ARC (9,3%), em relação às plantas da estratégia E3 (Figura 28).

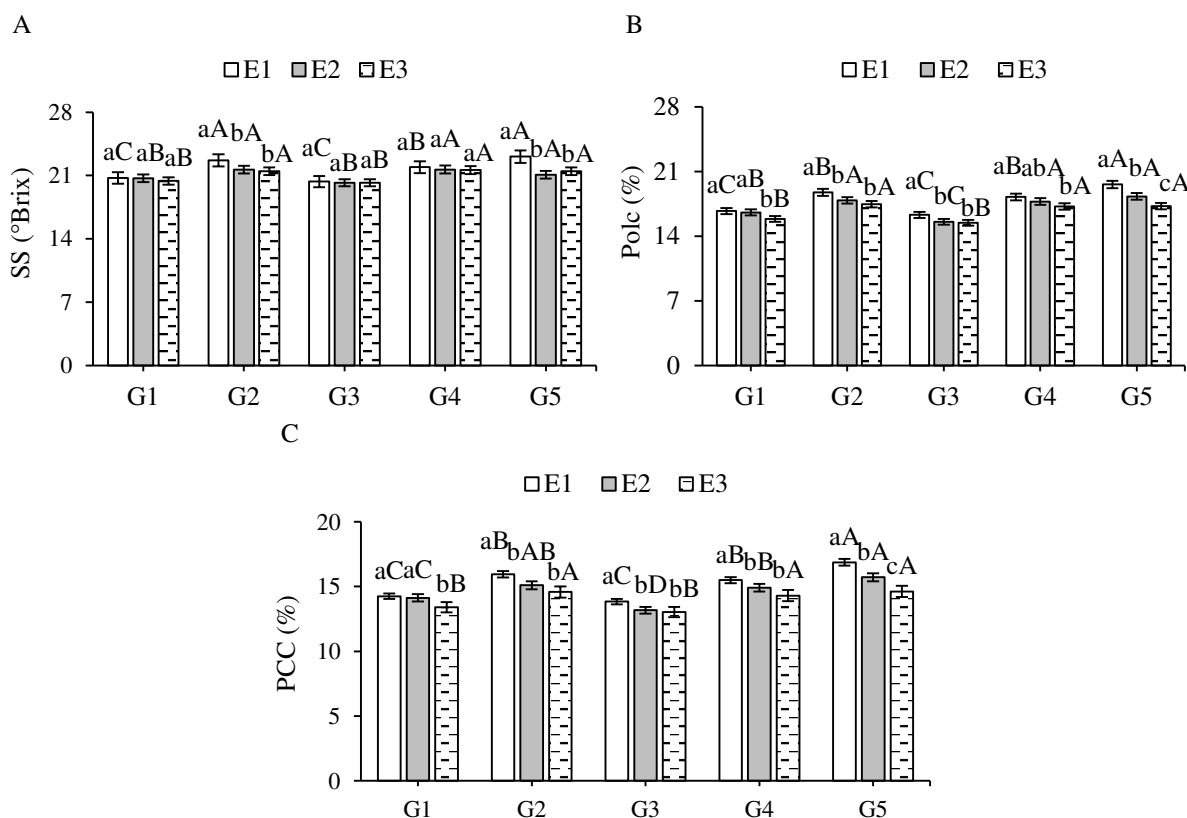
O efeito benéfico do piruvato observado no tratamento em que as plantas foram submetidas ao déficit hídrico (E2) pode ter ocorrido devido ao piruvato ser uma molécula crucial no metabolismo das plantas C<sub>4</sub>, responsável pela transformação do piruvato em fosfoenolpiruvato,ceptor inicial de CO<sub>2</sub> nas células do mesófilo (Taiz et al., 2017). Além disso, participa dos processos de respiração e produção de ATP, vitais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Com essa suplementação mais moléculas de piruvato, possivelmente, estavam disponíveis as células e a energia que seria despendida na glicólise para a produção de ácido pirúvico foi utilizada em processos de adaptação ao déficit hídrico.

Com piruvato, Barbosa et al. (2021) avaliaram seu efeito, via foliar, em duas cultivares de amendoim (IAC Caiapó e BR1) submetidas à restrição hídrica e constataram que a aplicação de 50 mM aliviou os efeitos do déficit hídrico sobre a cultivar IAC Caiapó, genótipo exigente em água, e restaurou as enzimas antioxidantes SOD (45,0%), CAT (129,0%) e APX (60,0%) na cv. BR1 que é tolerante à seca. Em outra pesquisa, com maracujazeiro cv. Redondo amarelo, Silva et al. (2022), ao avaliarem o efeito do piruvato como mitigador do estresse salino nas plantas em fase de mudas, observaram atenuação sobre as trocas gasosas e massa seca das raízes, com aplicação exógena de 50 mM de piruvato.

Em todo o Brasil, a cana-de-açúcar tem sido remunerada por seus índices qualitativos, de modo que, quanto melhor a qualidade da matéria prima, maior é o preço pago por tonelada de colmos (Farias et al., 2009). Todos os índices tecnológicos da cana, discutidos neste trabalho, são usados como base de cálculo para determinar a quantidade de açúcares totais recuperáveis (ATR) (Fernandes, 2000). Tal atributo é um dos mais importantes na produção de cana-de-açúcar para indústria, dependente da porcentagem de açúcar redutores da cana (ARC). Pelos

resultados desta pesquisa, em que se constatou menor média de ARC para a E2 (0,9%) em relação a E3 (1,1%), comprovando-se que a qualidade da matéria prima pode ser melhorada com a suplementação.

Para sólidos solúveis o déficit hídrico teve efeito prejudicial apenas sobre os genótipos RB92579 e RB041443, com reduções de 5,4 e 7,1%, respectivamente, em relação as plantas irrigadas durante todo ciclo (E1). Para os demais genótipos não houve diferença significativa entre as estratégias de manejo. Os genótipos RB92579 e RB041443 quando cultivados em condições de irrigação plena (E1) quanto em condições de déficit hídrico, obtiveram maiores porcentagens de sólidos solúveis totais (Figura 29A).

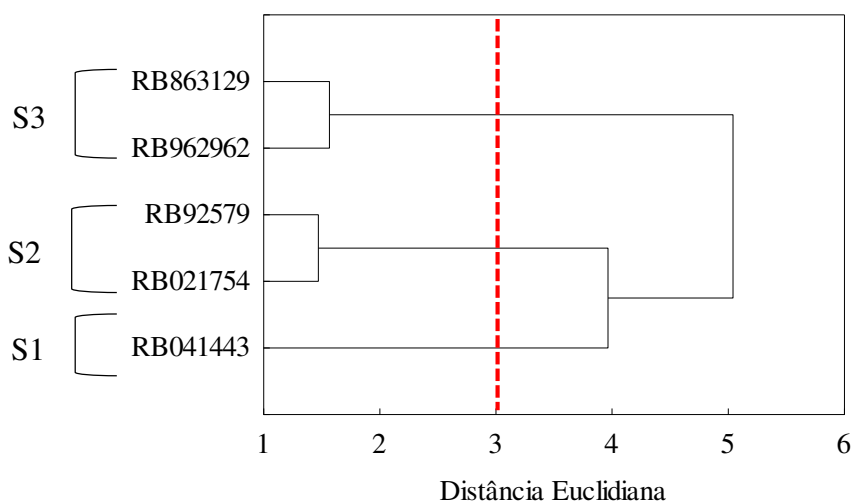


**Figura 29.** Desdobramento da interação para teor de sólidos solúveis - SS (A), teor de sacarose aparente do caldo - Polc (B) e Pol da cana corrigida - PCC (C) de cana-de-açúcar em função dos genótipos e das estratégias de manejo (G × E), aos 385 DAR. Letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre as estratégias de manejo e letras maiúsculas são indicativos de não haver diferença entre genótipos pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média ( $n = 3$ ). E1- irrigação plena, E2- déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico. G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443.



O teor de sacarose aparente do caldo (Polc) e pol da cana corrigida (PCC), foram afetados pelo déficit hídrico em todos os genótipos. Todavia, observou-se maior sensibilidade do genótipo RB041443 ao déficit hídrico (E3), reduzindo 12,1% a Polc e 13,3% a PCC, em comparação as plantas irrigadas (E1) (Figura 29B e C). Além disso, a aplicação de piruvato foi eficiente em recuperar o teor de sacarose polarizada da cana sobre os genótipos RB863129 e RB021754, e o Pol da cana corrigida no genótipo RB863129 (Figura 29B e C).

Na análise de Cluster, o corte foi realizado na Distância Euclidiana 3, possibilitando a divisão dos genótipos em subgrupos. O subgrupo 1 formado unicamente pelo RB041443, o subgrupo 2 por RB021754 e RB92579, enquanto o subgrupo 3 a partir dos genótipos RB962962 e RB863129 (Figura 30). A separação desses subgrupos demonstra que em termos de qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar, RB041443 tem dissimilaridade com os demais genótipos.



**Figura 30.** Dendrograma da análise de agrupamento (Cluster Analysis) de genótipos de cana-de-açúcar e formação de subgrupos com similaridade dentro do subgrupo e dissimilaridade entre os subgrupos.

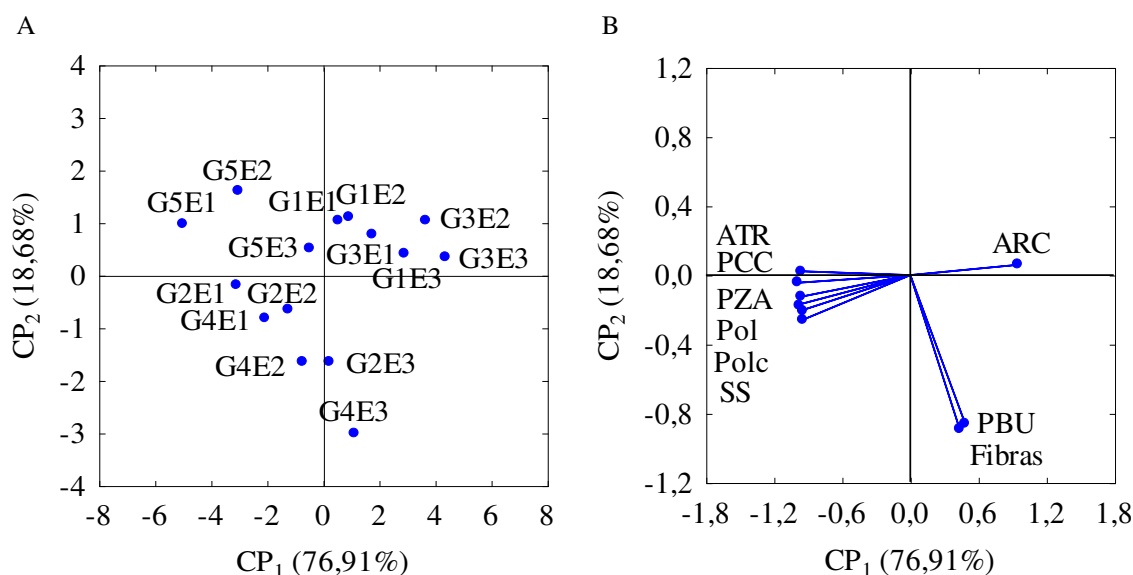
As nove variáveis originais foram condensadas em dois componentes principais, com autovalores maiores que 1, permitindo explicar 95,5% da variância contida nas variáveis originais (Tabela 12). O PC<sub>1</sub> contribuiu com 76,9% da variância total, formado a partir da combinação linear entre os atributos sacarose polarizada (Pol), teor de sólidos solúveis (SS), teor de sacarose aparente do caldo (Polc), pureza (PZA), pol da cana corrigida (PCC), porcentagem de açúcares redutores na cana (ARC) e açúcares totais recuperáveis (ATR). O PC<sub>2</sub> com 18,6% da variância remanescente, formado pelos atributos peso do bolo úmido (PBU) e porcentagem de fibra (Fibras).

**Tabela 12.** Autovalores, porcentagem de variância total explicada e coeficiente de correlações (r) entre as variáveis originais e os componentes principais, aos 385 DAR.

	Componentes principais (CP)								
	CP <sub>1</sub>			CP <sub>2</sub>					
Autovalores ( $\lambda$ )	6,92			1,68					
Porcentagem de variância total ( $S^2$ %)	76,91			18,68					
CPs	Coeficientes de correlação (r)								
	PBU	Pol	SS	Polc	PZA	PCC	Fibras	ARC	ATR
CP <sub>1</sub>	0,43	-0,95*	-0,95*	-0,98*	-0,96*	-0,99*	0,48	0,94*	-0,97*
CP <sub>2</sub>	-0,89*	-0,26	-0,20	-0,17	-0,12	-0,04	-0,86*	0,06	0,02

PBU- peso do bolo úmido; Pol- sacarose polarizada; SS- sólidos solúveis; Polc- teor de sacarose aparente do caldo; PZA- pureza; PCC- pol da cana corrigida; Fibras- teor de fibras; ARC- açúcares redutores na cana e ATR- açúcares totais recuperáveis. \*Variáveis consideradas r = 0,10 - 0,39 (fraco), 0,40 - 0,69 (moderado) e 0,70 - 1,00 (forte).

Na Figura 31A e B estão expostas as projeções bidimensionais dos efeitos dos tratamentos e atributos tecnológicos da cana-de-açúcar no primeiro e segundo componente principais (PC<sub>1</sub> e PC<sub>2</sub>). Os dois componentes principais construídos a partir das características originais descreveram com precisão as diferenças entre os genótipos e as estratégias de manejo. Os atributos com correlações positivas são responsáveis pela discriminação dos tratamentos localizados à direita do PC<sub>1</sub>, enquanto os atributos com correlações negativas são responsáveis pelos tratamentos a esquerda de PC<sub>1</sub> e na parte inferior de PC<sub>2</sub>.



**Figura 31.** Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores estudados (genótipos e estratégias de manejo) (A) e dos atributos de qualidade industrial da cana-de-açúcar (B). G1- RB863129, G2- RB92579, G3- RB962962, G4- RB021754 e G5- RB041443. E1 - irrigação plena, E2 - déficit hídrico e suplementação de piruvato e E3- déficit hídrico. Peso do bolo úmido (PBU), sacarose polarizada (Pol), teor de sacarose aparente do caldo (Polc), teor de sólidos solúveis (SS), pureza (PZA),

pol da cana corrigida (PCC), teor de fibras (Fibras), porcentagem de açúcares redutores na cana (ARC) e açúcares totais recuperáveis (ATR).

Com base nas características de qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, agrupados no PC<sub>1</sub>, os valores mais expressivos de açúcares totais recuperáveis (148,2 e 154,9 kg t<sup>-1</sup>), pol da cana corrigida (15,9 e 16,8%), pureza (82,6 e 84,2%), teor de sacarose aparente do caldo (18,7 e 19,6%), teor de sólidos solúveis (22,2 e 23,2 °Brix) e sacarose polarizada (77,7 e 77,2%) pertencem aos genótipos G2 (RB92579) e G5 (RB041443) sob irrigação plena (E1) em relação aos demais genótipos estudados (Figura 31A e B). O fornecimento adequado de água durante o ciclo da cana-de-açúcar, além de favorecer o crescimento e desenvolvimento, aumenta a produção e a quantidade de açúcares totais recuperáveis (ATR) (Farias et al., 2009; Sugiharto, 2018). Além disso, a divergência dos atributos tecnológicos entre as variedades pode estar relacionada às características genéticas dos materiais.

Para a porcentagem de açúcares redutores na cana, os maiores valores foram observados nos tratamentos G3E2 (1,1%) e G3E3 (1,2%) em relação aos demais tratamentos estudados, ou seja, os aumentos desses atributos influenciaram diretamente o baixo teor de ATR (Figura 31A e B). Segundo Prado et al. (2017), os açúcares redutores são empregados para designar a porcentagem de glicose e frutose, que são produtos precursores de cor no processo industrial de açúcar, isto é, intensificam a cor do açúcar, e seu aumento promove menor eficiência na recuperação da sacarose, depreciando a qualidade (Morais et al., 2022). Ao avaliarem os efeitos do déficit hídrico em diferentes fenofases de seis genótipos de cana-de-açúcar (SP79-1011, RB855113, RB92579, RB867515, RB72454 e RB855536), Endres et al. (2018) verificaram baixa qualidade industrial da cana, e com isso, menor ATR em RB855113.

No PC<sub>2</sub>, observou-se que o tratamento G4E3 (estresse hídrico sem suplementação foliar do piruvato), foi responsável pelo maior teor de fibra (13,2%) e o peso do bolo úmido (143,5 g) (Figura 31A e B). Sob o ponto de vista industrial, o teor de fibra é importante para o balanço energético da indústria, pois as fibras são empregadas para gerar energia elétrica, bem como para a venda do excedente (Simões et al., 2018).

Altos teores de fibras aumentam a resistência à extração do caldo pela indústria e baixos teores reduzem a resistência ao tombamento e, geralmente, são mais resistentes a penetração de pragas no colmo (Viana et al., 2019; Moraes et al., 2022). Todavia, Prado et al. (2017), reforçam que para a produção de etanol e açúcar o aumento da fibra é indesejável, pois limita o processo de extração da sacarose e resulta em baixo rendimento de etanol. Por isso, a indústria sucroenergética requer materiais com teores entre 10,5 e 12,5% de fibras (Oliveira et al., 2009).

Segundo Simões et al (2018), cada adição de 0,5% no teor de fibras reduz de 10,0 a 20,0% o rendimento da moagem, diminuindo aproximadamente 1 kg de açúcar por tonelada.

De modo geral, os dados evidenciam o efeito benéfico do piruvato em decorrência da suplementação, no metabolismo C4, no qual se enquadra a cana-de-açúcar, o piruvato pode favorecer os mecanismos energéticos da planta, que não necessitam de ativação dos processos envolvidos na glicólise, pois moléculas de piruvato estão disponíveis, reforçando o substrato para produção de ATP. Com a suplementação, parte da energia gasta na glicólise para a produção de ácido pirúvico é utilizado em processos de adaptação ao déficit hídrico. Em termos de ganho, constatou-se aumento na ATR de 3,8% (RB863129), 3,9% (RB92579) e 4,8% (RB041443), quando suplementados com piruvato. Esses resultados confirmam que tais genótipos respondem satisfatoriamente à suplementação desse produto, alcançando resultados produtivos satisfatórios e qualidade industrial para a matéria-prima produzida.

## **9 CONCLUSÕES**

A suplementação de piruvato em cana-de-açúcar cultivadas sob déficit hídrico na fase de perfilhamento e alongamento do colmo favorece a trocas gasosas, atividade das enzimas antioxidantes, teor pigmentos fotossintéticos, fluorescência da clorofila *a* das plantas de cana-de-açúcar, sem interação com os genótipos.

A suplementação de piruvato restaura totalmente a altura de plantas (RB021754), o número de colmos (RB863129), a massa de colmos (RB041443), o comprimento do colmo e a produtividade da água (RB863129, RB92579, RB962962 e RB041443).

Os atributos tecnológicos são beneficiados com suplementação de piruvato, com maior expressão no pol da cana-corrugada (RB863129) e no teor de sacarose aparente do caldo (RB863129 e RB021754) em cana-de-açúcar sob déficit hídrico.

Devido aos efeitos benéficos da suplementação de piruvato, testes de validação são recomendados para a adoção dessa tecnologia em condições de campo.

## LITERATURA CITADA

- Abbas, S. R.; Ahmad S. D.; Sabir S. M.; Shah A. H. Detection of drought tolerant sugarcane genotypes (*Saccharum officinarum*) using lipid peroxidation, antioxidante activity, glycine-betaine and proline contentes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v.14, p.233-243, 2014. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162014005000019>
- Anjum, S. A.; Ashraf, U.; Tanveer, M.; Khan, I.; Hussain, S.; Shahzad, B.; Wang, L. C. Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. *Frontiers in plant science*, v.8, p.1-11, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00069>
- Aquino, G. S.; Medina, C. C.; Porteira, A. L.; Santos, L. O.; Cunha, A. C. B.; Kussaba, D. A. O.; Santos Júnior, A. H.; Almeida, L. F.; Santiago, A. D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, p.1150-1159, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001200004>
- Arnon, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant physiology*, v.24, p.1, 1949. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Aude, M. I. S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. *Ciência Rural*, v.23, p.241-248, 1993. <https://doi.org/10.1590/S0103-84781993000200022>
- Azevedo, J. V. V.; Santos, C. A. C.; Alves, T. L. B.; Azevedo, P.; Olinda, R. A. Influence of climate on the incidence of acute respiratory infections in children at the districts of Campina Grande and Monteiro, Paraíba, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.30, p.467-477, 2015. <https://doi.org/10.1590/0102-778620140066>
- Baker, N. R. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, v.59, p.89-113, 2008. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
- Baker, N. R.; Rosenqvist, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: An examination of future possibilities. *Journal of experimental botany*, v.55, p.1607-1621, 2004. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh196>
- Barbosa, D. D.; Fernandes, P. D.; Marcelino, A. D. A. L.; Silva, F. A.; Dias, M. S.; Silva, C. R. C.; Santos, R. C. Exogenous pyruvate mitigates the detrimental effects of water stress in contrasting peanut genotypes. *Genetics and Molecular Research*. v.20, p.1-14, 2021. <https://doi.org/10.4238/gmr18907>
- Barrs, H. D.; Weatherley, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian journal of biological sciences*, v.15, p.413-428, 1962. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>
- Bates, L. S. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, v.39, p.205-207, 1973. <https://doi.org/10.1007/bf00018060>
- Batista, E. L.; Zolnier, S.; Ribeiro, A.; Lyra, G. B.; Silva, T. G.; Boehringer, D. Avaliação do efeito do estresse hídrico no crescimento de cultivares de cana-de-açúcar usando um sistema automático de fertirrigação. *Engenharia Agrícola*, v.35, p.215-229, 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n2p215-229/2015>
- Beauchamp, C.O.; Fridovich, I. Isoenzymes of superoxide dismutase from wheat germ. *Biochimica et Biophysica Acta*, New York, v.317, p.50-64, 1973. [https://doi.org/10.1016/0005-2795\(73\)90198-0](https://doi.org/10.1016/0005-2795(73)90198-0)
- Begum, M. K.; Alam, M. R.; Islam, M. S.; Arefin, M. S. Effect of water stress on physiological characters and juice quality of sugarcane. *Sugar Tech*, v.14, p.161-167, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0140-6>
- Boaretto, L. F.; Carvalho, G.; Borgo, L.; Creste, S.; Landell, M. G.; Mazzafera, P.; Azevedo, R. A. Water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant

- sugarcane genotypes. *Plant Physiology and Biochemistry*, v.74, p.165-175, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.016>
- Bolh ar-Nordenkamp, H. R.; Long, S. P.; Baker, N. R.;  quist, G.; Schreider, U.; Lechner E. G. Chlorophyll fluorescence as probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: A review of current instrument. *Functional Ecology*, v.3, p.497-514, 1989. <https://doi.org/10.2307/2389624>
- Bradford, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, v.72, p.248-254, 1976. <https://doi.org/10.1006/abio.1976.9999>
- Cacefo, V.; Ribas, A. F.; Zilliani, R. R.; Neris, D. M.; Domingues, D. S.; Moro, A. L.; Vieira, L. G. E. Decarboxylation mechanisms of C4 photosynthesis in *Saccharum* spp.: increased PEPC activity under water-limiting conditions. *BMC plant biology*, v.19, p.1-14, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1745-7>
- Carlesso, R. Absor o de  gua pelas plantas:  gua dispon vel versus extra vel e a produtividade das culturas. *Ci ncia Rural*, v.25, p.183-188, 1995. <https://doi.org/10.1590/S0103-84781995000100035>
- Carmo-Silva, A. E.; Gore, M. A.; Andrade-Sanchez, P.; French, A. N.; Hunsaker, D. J.; Salvucci, M. E. Decreased CO<sub>2</sub> availability and inactivation of Rubisco limit photosynthesis in cotton plants under heat and drought stress in the field. *Environmental and Experimental Botany*, v.83, p.1-11, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.001>
- Chaves, M. M.; Flexas, J.; Pinheiro, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of botany*, v.103, p.551-560, 2009. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-a ugar, Bras lia, v.10, 2023. Dispon vel: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana>. Acesso em: Jan. 2024.
- CONSECANA - Conselho dos Produtores de Cana-de-a ugar, A ugar e  lcool do Estado de S o Paulo. 2006. Manual de instru es. 5. ed. Piracicaba: CONSECANA. 112p.
- Dias, M.S.; Fernandes, P.D.; Silva, F.A.; Marcelino, A.D.A.L.; Barbosa, D.D.; Santos, R.C.; Reis, L.S.; Lima, V.L.A. Pyruvate supplementation in cotton under water restriction varying the phenological phases. *Acta Scientiarum. Agronomy*. v.45, e61973, 2023. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.61973>
- Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Landell, M. G. A. Cana-de-a ugar. Campinas: Instituto Agron mico, 2010. 882p.
- Dinh, T. H.; Takaragawa, H.; Le Trong, L.; Taira, E.; Kawamitsu, Y. Variations in growth performance and nitrogen uptake of sugarcane cultivars under rain-fed conditions. *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*, v.3, p.571-579, 2020. <https://doi.org/10.31817/vjas.2020.3.2.01>
- Diola, V.; Santos, F. Fisiologia. In: Santos, F.; Bor m, A.; Caldas, C. (ed.). Cana-de-a ugar: bioenergia, a ugar e  lcool: tecnologias e perspectivas. Vi osa: Editora UFV. 2010. Cap.2, p.25-49.
- 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, p.1-18, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100027>
- Du, Y.C.; Nose, A.; Wasano, K.; Uchida, Y. Responses to water stress of enzyme activities and metabolite levels in relation to sucrose and starch synthesis, the Calvin cycle and the C4 pathway in sugarcane (*Saccharum* sp.) leaves. *Functional Plant Biology*, v.25, p.253-260, 1998. <https://doi.org/10.1071/PP97015>
- Elsheery, N. I.; Sunoj, V. S. J.; Wen, Y.; Zhu, J. J.; Muralidharan, G.; Cao, K. F. Foliar application of nanoparticles mitigates the chilling effect on photosynthesis and

- photoprotection in sugarcane. *Plant Physiology and Biochemistry*, v.149, p.50-60, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.035>
- Endres, L.; Santos, C. M.; Souza, G. V. de; Menossi, M.; Santos, J. C. M. Morphological changes recorded in different phenophases of sugarcane plants subjected to water stress in tropical field conditions. *Australian Journal of Crop Science*, v.12, p.1041-1050, 2018. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.07.PNE780>
- Farias, C. H. A.; Fernandes, P. D.; Gheyi, H. R.; Dantas Neto, J. Qualidade industrial de cana-de-açúcar sob irrigação e adubação com zinco, em Tabuleiro Costeiro paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.419-428, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400008>
- Fernandes A.C. Cálculos na Agroindústria da cana de açúcar. 1.ed. Piracicaba, STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos. 2000, 193p.
- Fernandes, P. D.; Brito, M. E. B.; Gheyi, H. R.; Andrade, A. P.; Medeiros, S. S. Halofitismo e agricultura bioassalada. Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F.; Gomes Filho, E. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal. 2016. Cap.15, p.209-242.
- Ferreira, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista brasileira de biometria*, v.37, p.529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- Figueiredo, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Landell, M. G. A. (eds.). *Cana-de-açúcar*. Campinas, SP: Instituto Agrônomo. 2010. Cap.1, p.31-57.
- Foyer, C. H. Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. *Environmental and experimental botany*, v.154, p.134-142, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.003>
- García-Sánchez, F.; Simón-Grao, S.; Martínez-Nicolás, J.J.; Alfosea-Simón, M.; Liu, C.; Chatzissavvidis, C.; Pérez-Pérez, J. G.; Cámara-Zapata, J.M. Multiple stresses occurring with boron toxicity and deficiency in plants. *Journal of hazardous Materials*, v.397, e122713, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122713>
- Geerts, S.; Raes, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, v.96, p.1275-1284, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009>
- Ghannoum, O. C4 photosynthesis and water stress. *Annals of botany*, v.103, p.635-644, 2009. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn093>
- Giannopolitis C.N.; Ries S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*. v.59, p.309-314, 1977. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
- Gomathi, R.; Krishnapriya, V.; Arunkumar, R.; Govindaraj, P.; Ram, B. Physiological traits imparting drought stress tolerance to promising sugarcane (*Saccharum* spp.) clones. *Plant Physiology Reports*, v.25, p.509-515, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40502-020-00536-2>
- Gomathi, R.; Thandapani, P. Influence of salinity stress on growth parameters and yield of sugarcane. *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, v.9, p.28-32, 2014. <https://doi.org/10.9790/3008-09342832>
- Govaerts, B.; Sayre, K. D.; Lichter, K.; Dendooven, L.; Deckers, J. Influence of permanent planting in high bed and residue management on physical and chemical soil quality in rainfed corn/wheat systems. *Plant and Soil*, v.291, p.39-54, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9172-6>
- Hair, F. J.; Black, W. C.; Babin, B. J.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L. Análise multivariada de dados. 6. ed. Tradução Sant'Anna, A. S. Porto Alegre: Bookman. 2009. 688p.
- Hamani, A. K. M.; Wang, G.; Sothar, M. K.; Shen, X.; Gao, Y.; Qiu, R.; Mehmood, F. Responses of leaf gas exchange attributes, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes



- in NaCl-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings to exogenous glycine betaine and salicylic acid. *BMC Plant Biology*, v.20, p.1-14, 2020. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02624-9>
- Hasanuzzaman, M.; Bhuyan, M. H. M. B.; Zulfiqar, F.; Raza, A.; Mohsin, S. M.; Mahmud, J. A.; Fujita, M.; Fotopoulos, V. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, v.9, p.681, 2020. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
- Havir, E. A.; Mchale, N. A. C. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. *Plant Physiology*, v.84, p.450-455, 1987. <https://doi.org/10.1104/pp.84.2.450>
- Hemaprabha, G.; Swapna, S.; Lavanya, D.L.; Sajitha, B.; Venkataramana, S. Evaluation of Drought Tolerance Potential of Elite Genotypes and Progenies of Sugarcane (*Saccharum sp.* hybrids). *Sugar Tech*. v.15, p.9-16, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0182-9>
- Hermann, E. R.; Câmara, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. *Revista da STAB*, v.17, p.32-34, 1999.
- Herritt, M.T.; Pauli, D.; Mockler, T.C.; Thompson, A.L. Chlorophyll fluorescence imaging captures photochemical efficiency of grain sorghum (*Sorghum bicolor*) in a field setting. *Plant methods*, v.16, p.1-13, 2020. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00650-0>
- Hnilicka, F.; Lysytskyi, S.; Rygl, T.; Hnilickova, H.; Pecka, J. Effect of Short-Term Water Deficit on Selected Physiological Properties of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Plants. *Agronomy*, v.13, p.2892, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122892>
- Hoang, D. T.; Hiroo, T.; Yoshinobu, K. Nitrogen use efficiency and drought tolerant ability of various sugarcane varieties under drought stress at early growth stage. *Plant Production Science*, v.22, p.250-261, 2019. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1540277>
- Hosseinifard, M.; Stefaniak, S.; Javid, M. G.; Soltani, E.; Wojtyła, Ł.; Garnczarska, M. Contribution of Exogenous Proline to Abiotic Stresses Tolerance in Plants: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, v.23, p.5186, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijms23095186>
- Inman-Bamber, N. G. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field crops research*, v.92, p.185-202, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>
- Inman-Bamber, N. G.; Smith, D. M. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field Crops Research*, v.89, p.107-122, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.018>
- Jadoski, C. J.; Toppa, E. V. B.; Julianetti, A.; Hulshof, T.; Ono, E. O.; Rodrigues, J. D. Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. *Applied Research & Agrotechnology*, v.3, p.169-176, 2010. <https://doi.org/10.5777/paet.v3i2.1064>
- Konrad, M. L. F.; Silva, J. A. B. da; Furlani, P. R.; Machado, E. C. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em seis cultivares de cafeeiro sob estresse de alumínio. *Bragantia*, v.64, p.339-347, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000300004>
- Kramer, D. M.; Johnson, G.; Kiirats, O.; Edwards, G. New fluorescence parameters for determination of QA redox state and excitation energy fluxes. *Photosynthesis Research*, v.79, p.209-218, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:PRES.0000015391.99477.0d>
- Kuijper, J. Bijdrage tot de physiologie der huidmondjes van *Saccharum officinarum* L. *Archief Suikerind*, v.23, p.1673-1700, 1915.
- Laxa, M.; Liebthal, M.; Telman, W.; Chibani, K.; Dietz, K. J. The role of the plant antioxidant system in drought tolerance. *Antioxidants*, v.8, p.94, 2019. <https://doi.org/10.3390/antiox8040094>
- Leanasawat, N.; Kosittrakun, M.; Lontom, W.; Songsri, P. Physiological and Agronomic Traits of Certain Sugarcane Genotypes Grown under Field Conditions as Influenced by Early Drought Stress. *Agronomy*, v.11, p.2319, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomia11112319>

- Leegood, R. C. Carbon Dioxide-Concentrating Mechanisms: C<sub>4</sub> Photosynthesis and Crassulacean Acid Metabolism. In: Lea, P. J.; Leegood, R. C. (eds.). *Plant Biochemistry and Molecular Biology*. New York: John Wiley & Sons. 1993. p.47-72.
- Lichtenthaler, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: *Methods in enzymology*. Academic Press, 1987. Cap.34, p.350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Lima, G. S.; Dias, A. S.; Soares, L. A. A.; Gheyi, H. R.; Nobre, R. G.; Silva, A. A. R. Eficiência fotoquímica, partição de fotoassimilados e produção do algodoeiro sob estresse salino e adubação nitrogenada. *Revista de Ciências Agrárias*, v.43, p.214-225, 2019. <https://doi.org/10.19084/RCA18123>
- Lin, H.; Arrivault, S.; Coe, R. A.; Karki, S.; Covshoff, S.; Bagunu, E.; Lunn, J. E.; Stitt, M.; Furbank, R. T.; Hibberd, J. M.; Quick, W. P. A partial C<sub>4</sub> photosynthetic biochemical pathway in rice. *Frontiers in plant science*, v.11, p.1-12, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.564463>
- Magalhães Filho, J. R.; Amaral, L. R. do; Machado, D. F. S. P.; Medina, C. L.; Machado, E. C. Deficiência hídrica, trocas gasosas e crescimento de raízes em laranjeira ‘valência’ sobre dois tipos de porta-enxerto. *Bragantia*, v.67, p.75-82, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000100009>
- Maia Júnior, S. O.; Andrade, J. R.; Santos, C. M.; Santos, J. V.; Silva, L. K. S; Aprigio Clemente, P. R.; Ferreira, V. M.; Silva, J. V.; Endres, L. Foliar-applied glycine betaine minimizes drought stress-related impact to gas exchange and the photochemical efficiency of PSII in sugarcane. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, v.32, p.315-329, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40626-020-00188-5>
- Maia Júnior, S. O.; Silva, J. A. C.; Santos, K. P. O.; Cordeiro, D. R.; Silva, J. V.; Endres, L. Respostas morfológicas e fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar sob estresse hídrico no segundo ciclo de cultivo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.12, p.2661, 2018. <https://doi.org/10.7127/rbai.v12n300830>
- Majerowicz, N. Fotossíntese. In: Kerbauy, G. B. (ed.). *Fisiologia vegetal*. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 2019. Cap.5, p.124-189.
- Marcos, F. C.; Silveira, N. M.; Mokochinski, J. B.; Sawaya, A. C.; Marchiori, P. E., Machado, E. C.; Souza, G. M.; Landell, M. G. A.; Ribeiro, R. V. Drought tolerance of sugarcane is improved by previous exposure to water deficit. *Journal of plant physiology*, v.223, p.9-18, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.02.001>
- Marin, F. R.; Pellegrino, G. Q.; Assad, E. D.; Pinto, H. S.; Junior, J. Z. Cultivos temporários: cana-de-açúcar. In: Monteiro, J., E. *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. 2009, Cap.2, p.109-130.
- Martinazzo, E. G.; Perboni, A. T.; Oliveira, P. V.; Bianchi, V. J.; Bacarin, M. A. Photosynthetic activity in japanese plum under water deficit and flooding. *Ciência Rural*, v.43, p.35-41, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012005000126>
- Matos, M.; Santos, F.; Eichler, P. Sugarcane world scenario. In: Santos, F.; Rabelo, S.; Matos, M.; Eichler, P. (eds.). *Sugarcane biorefinery, technology and perspectives*. Academic Press, 2020. Cap.1, p.1-19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00001-9>
- Melo Filho, J. F. D.; Sacramento, J. A.; Conceição, B. P. Water-retention curve modelled by the psychrometer method for soil physical quality index determination. *Engenharia Agrícola*, v.35, p.959-966, 2015. Doi:<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n5p959-966/2015>
- Misra, V.; Solomon, S.; Mall, A. K.; Prajapati, C. P.; Hashem, A.; Abd\_Allah, E. F.; Ansari, M. I. Morphological assessment of water stressed sugarcane: A comparison of waterlogged and drought affected crop. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v.27, p.1228-1236, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.02.007>

- Mittler, R.; Blumwald, E. The roles of ROS and ABA in systemic acquired acclimation. *The Plant Cell*, v.27, p.64-70, 2015. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.133090>
- 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, p.1-8, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107035>
- Morais, J. E. F.; França e Silva, E. F. D.; Neto, A. H. G.; Lima, B. L. C.; Lira, R. M.; Costa Berto, S. D.; Jardim, A. M. R. F.; Neto, D. E. S.; Silva, T. G. F.; Rolim, M. M. Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under saline stress: Growth, productivity, technological quality, and industrial yield. *Industrial Crops and Products*, v.188, p.115642, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115642>
- Morais, M. B.; Azevedo, R. A.; Camara, T. R.; Ulisses, C.; Albuquerque, C. C.; Willadino, L. Antioxidative metabolism in sugarcane (*Poaceae*) varieties subjected to water and saline stress. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.24, p.776-782, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n11p776-782>
- Nakano, Y.; Asada, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, v.22, p.867-880, 1981. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>
- Oliveira, E. L.; Andrade, L. A. B.; Faria, M. A.; Evangelista, A. W. P.; Morais, A. R. Uso de vinhaça de alambique e nitrogênio em cana-de-açúcar irrigada e não irrigada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.44, p.1398-1403, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009001100005>
- Oliveira, L. A.; Miranda, J. H.; Cooke, R. A. Water management for sugarcane and corn under future climate scenarios in Brazil. *Agricultural water management*, v.201, p.199-206, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.019>
- Oxborough, K.; Baker, N.R. An instrument capable of image chlorophyll a fluorescence from intact leaves at very low irradiance and at the cellular and subcellular levels of organization. *Plant, Cell and Environment*, v.20, p.1473-1483, 1997. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-42.x>
- Parveen, A.; Ashraf, M. A.; Hussain, I.; Perveen, S.; Rasheed, R.; Mahmood, Q.; Hussain, S.; Ditta, A.; Hashem, A.; Al-Arjani, A. F.; Alqarawi, A. A.; Allah, E. F. A. Promotion of growth and physiological characteristics in water-stressed *Triticum aestivum* in relation to foliar-application of salicylic acid. *Water*, v.13, p.1316, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13091316>
- Pereira, J. W. L.; Silva, E. C. A.; Luz, L. N.; Nogueira, R. J. M. C.; Filho, P. D. A. M.; Lima, L. M.; dos Santos, R. C. Cluster analysis to select peanut drought tolerance lines. *Australian Journal of Crop Science*, v.9, p.1095-1105, 2015.
- Prado, E. A. F.; Vitorino, A. C. T.; Mauad, M.; Ensinas, S. C.; Paim, L. R. Características tecnológicas da cana-de-açúcar sob aplicação de doses de vinhaça em Latossolo Vermelho distroférico. *Revista de ciências agroveterinárias*, v.16, p.386-395, 2017. <http://dx.doi.org/10.5965/223811711642017386>
- Rabelo, S. C.; Paiva, L. B. B.; Pin, T. C.; Pinto, L. F. R.; Tovar, L. P.; Nakasu, P. Y. S. Chemical and energy potential of sugarcane. In: Santos, F.; Rabelo, S.; Matos, M.; Eichler, P. (ed.). *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*. Academic Press, 2020. Cap.8, p.141-163. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00008-1>
- RIDESA- Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar. In: Oliveira, R. A. de, Barbosa, G. V. de S., Daros, E. (ed.). *50 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 30 anos de RIDESA*. Curitiba: UFPR. RIDESA, 2021. 199p. Disponível em:

- [https://www.ridesa.com.br/\\_files/ugd/242756\\_f3e42975bd9a42589327663cde52e255.pdf](https://www.ridesa.com.br/_files/ugd/242756_f3e42975bd9a42589327663cde52e255.pdf). Acesso: 13 Jan. 2023.
- Rousseau, C.; Belin, É.; Bove, E.; Rousseau, D.; Fabre, F.; Berruyer, R.; Guillaumès, J.; Manceau, C.; Jacques, M.; Boureau, T. High throughput quantitative phenotyping of plant resistance using chlorophyll fluorescence image analysis. *Plant Methods*, v.9, p.1-13, 2013. <https://doi.org/10.1186/1746-4811-9-17>
- Ruban, A.V. Nonphotochemical chlorophyll fluorescence quenching: mechanism and effectiveness in protecting plants from photodamage. *Plant physiology*, v.170, p.1903–1916, 2016. <https://doi.org/10.1104/pp.15.01935>
- Sage, R. F.; Peixoto, M. M.; Sage, T. L. Photosynthesis in sugarcane. In: Moore, P. H.; Botha, F. C. (eds.). *Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology*. Iowa: Wiley-Blackwell. 2013. Cap.6, p.121-154. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch6>
- Sales, C. R.; Ribeiro, R. V.; Silveira, J. A.; Machado, E. C.; Martins, M. O.; Lagôa, A. M. M. Superoxide dismutase and ascorbate peroxidase improve the recovery of photosynthesis in sugarcane plants subjected to water deficit and low substrate temperature. *Plant Physiology and Biochemistry*, v.73, p.326-336, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.10.012>
- Santos, F.; Eichler, P.; Machado, G.; Mattia, J. de; Souza, G. de. By-products of the sugarcane industry. In: Santos, F.; Rabelo, S.; Matos, M. de; Eichler, P. (Ed.). *Sugarcane biorefinery, technology and perspectives*. Academic Press. 2020. Cap.2, p.21-48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00002-0>
- Scarpari, M. S.; Beauclair, E. G. F. Anatomia e botânica. In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Landell, M. G. A. (eds.). *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agrônomo. 2008. Cap.2, p.45-56.
- Schlüter, U.; Weber, A. P. Regulation and evolution of C4 photosynthesis. *Annual review of plant biology*, v.71, p.183-215, 2020. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042916-040915>
- Shen, J. L.; Li, C. L.; Wang, M.; He, L. L.; Lin, M. Y.; Chen, D. H.; Zhang, W. Mitochondrial pyruvate carrier 1 mediates abscisic acid-regulated stomatal closure and the drought response by affecting cellular pyruvate content in *Arabidopsis thaliana*. *BMC plant biology*, v.17, p.217, 2017. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1175-3>
- Silva, F. A.; Dias, M. S.; Fernandes, P. D.; Lacerda, C. N.; Silva, A. A. R.; Marcelino, A. D. A. L.; Lima, A. M.; Barbosa, D. D. Calcium pyruvate as a salt stress mitigator in yellow passion fruit seedlings. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.26, p.763-770, 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n11p763-770>
- Silva, F. A.; Dias, M. S.; Fernandes, P. D.; Marcelino, A. D. A. L.; Lima, A. M.; Pereira, R. F.; Barbosa, D. D.; Silva, M. F. C.; Silva, A. A. R.; Santos, R. C. Pyruvic acid as attenuator of water deficit in cotton plants varying the phenological stage. *Brazilian Journal of Biology*, v.83, p.1-8, 2023. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.272003>
- Silva, M. A.; Jeronimo, E. M.; Dal'Col Lúcio, A. Perfilhamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.979-986, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000800005>
- Silva, M. A.; Jifon, J. L.; Silva, J. A. G.; Santos, C. M.; Sharma, V. Relationships between physiological traits and productivity of sugarcane in response to water deficit. *Journal of Agricultural Science*, v.152, p.104-118, 2014. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000834>
- Silva, P. P.; Soares, L.; Costa, J. G.; Silva Viana, L.; Andrade, J. C. F.; Gonçalves, E. R.; Santos, J. M.; Barbosa, G. V. S.; Nascimento, V.X.; Todaro, A. R.; Riffel, A.; Grossi-de-Sá, M. F.; Barbosa, H. P.; Sant'Ana, A. E. G.; Neto, C. E. R. Path analysis for selection of drought tolerant sugarcane genotypes through physiological components. *Industrial Crops and Products*, v.37, p.11-19, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.11.015>

- Silva, M. A.; Santos, C. M.; Arantes, M. T.; Brunelli, M. C.; Holanda, L. A. Respostas fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica e a reidratação. *Revista Caatinga*, v.26, p.28-35, 2013.
- Simkin, A. J.; Kapoor, L.; Doss, C. G. P.; Hofmann, T. A.; Lawson, T.; Ramamoorthy, S. The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. *Photosynthesis Research*, v.152, p.23-42, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00892-6>.
- Simões, W. L.; Calgaro, M.; Guimarães, M. J.; Oliveira, A. R.; Pinheiro, M. P. M. A. Sugarcane crops with controlled water deficit in the Sub-Middle São Francisco Valley, Brazil. *Revista Caatinga*, v.31, p.963-971, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252018v31n419rc>
- Souza, C. A.; Vitti, A. C.; Sanquetta, C. R.; Gaitarossa, E. C. Produção de biomassa da cana-de-açúcar por meio do uso de organominerais em cana planta e cana soca. *BIOFIX Scientific Journal*, v.1, p.38-43, 2016. <https://doi.org/10.5380/biofix.v1i1.49098>
- Souza, J. L.; Santos, R. B.; Nunes, V. V.; Torres, M. F. O.; Calazans, C.C.; Junior, L. F. G. O.; Silva-Mann, R. Déficit hídrico no desenvolvimento de cultivares de cana-de-açúcar. *Global science and technology*, v13, p.13, 196-210, 2020.
- Spinoso-Castillo, J. L.; Moreno-Hernández, M. D. R.; Mancilla-Álvarez, E.; Sánchez-Segura, L.; Sánchez-Páez, R.; Bello-Bello, J. J. Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis improves ex vitro acclimatization of sugarcane plantlets (*Saccharum Spp.*) under drought stress conditions. *Plants*, v.12, p.687, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12030687>
- Statsoft, I.N.C. Programa computacional Statistica 7.0. Hamburg: Statsoft, 2004.
- Stefanov, M.; Rashkov, G.; Borisova, P.; Apostolova, E. Sensitivity of the Photosynthetic Apparatus in Maize and Sorghum under Different Drought Levels. *Plants*, v.12, p.1863, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12091863>
- Sugiharto, B. Biotechnology of Drought-Tolerant Sugarcane. In: de Oliveira, A. B. (ed.). *Sugarcane - Technology and Research*. IntechOpen. 2018. Cap.8, p.139-145. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72436>
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.
- Tavanti, T. R.; Melo, A. A. R.; Moreira, L. D. K.; Sanchez, D. E. J.; Silva, R. S.; Silva, R. M.; Reis, A. R. Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v.160, p.383-396, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.040>
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, D.; Teixeira, W.G. *Manual de métodos de análise de solo*. Brasília: Embrapa, 2017, p.573.
- Thomas, A. L.; Costa, J. A.; Lange, C. E. Desenvolvimento da planta de Cana-de-açúcar. In: Thomas, A. L. (ed.). *Desenvolvimento das Plantas da Batata, Mandioca, Fumo e Cana-de-açúcar*. Porto Alegre: UFRS. 2016. p.55-75.
- Urmí, T. A.; Islam, M. M. M.; Zumur, K. N.; Abedin, M. A.; Haque, M. M.; Siddiqui, M. H.; Murata, Y.; Hoque, M. A. M. Combined effect of salicylic acid and proline mitigates drought stress in rice (*Oryza sativa* L.) through the modulation of physiological attributes and antioxidant enzymes. *Antioxidants*, v.12, p.1438, 2023. <https://doi.org/10.3390/antiox12071438>
- Van Genuchten, M. T. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity on unsaturated soil. *Soil Science Society of American Journal*, v.44, p.892-897, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vandenbergh, L. P. S.; Valladares-Diestra, K. K.; Bittencourt, G. A.; Torres, L. Z.; Vieira, S.; Karp, S. G.; Sydney, E. B.; Carvalho, J. C.; Soccol, V. T.; Soccol, C. R. Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.167, p.1-18, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721>

- Venkataramana, S.; Gururajao, P. N.; Naidu, K. M. The effects of water stress during the formative phase on stomatal resistance and leaf water potential and its relation with yield in ten sugarcane varieties. *Field Crop Research*, v.13, p.345-355, 1986. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(86\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(86)90035-3)
- Verma, K. K.; Song, X. P.; Lin, B.; Guo, D. J.; Singh, M.; Rajput, V. D.; Singh, R. K.; Singh, P.; Sharma, A.; Malviya, M. K.; Chen, G. L.; Li, Y. R. Silicon induced drought tolerance in crop plants: physiological adaptation strategies. *Silicon*, v.14, p.2473-2487, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01071-x>
- Verma, K. K.; Song, X. P.; Verma, C. L.; Chen, Z. L.; Rajput, V. D.; Wu, K. C.; Liao, F.; Chen, G. L.; Li, Y. R. Functional relationship between photosynthetic leaf gas exchange in response to silicon application and water stress mitigation in sugarcane. *Biological Research*, v.54, p.1-11, 2021a. <https://doi.org/10.1186/s40659-021-00338-2>
- Verma, K. K.; Song, X. P.; Zeng, Y.; Guo, D. J.; Singh, M.; Rajput, V. D.; Malviya, M. K.; Wei, K. J.; Sharma, A.; Li, D. P.; Chen, G. L.; Li, Y. R. Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, v.166, p.582-592, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.032>
- Viana, R. S.; Moreira, B. R. A.; Lisboa, L. A. M.; Figueiredo, P. A. M.; Ramos, S. B.; Ramos, S. B.; Dias, G. H. O.; Moreira, L. C.; Spotoni, M. T.; Recco, C. R. S. B. Exogenous spraying of plant's resistance inducers improves yield and sugarcane quality. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, v.25, p.833-844, 2019.
- Vilela, R. D.; Bezerra, B. K. L.; Froehlich, A.; Endres, L. Antioxidant system is essential to increase drought tolerance of sugarcane. *Annals of Applied Biology*, v.171, p.451-463, 2017. <https://doi.org/10.1111/aab.12387>
- Watt, D. A.; McCormick, A. J.; Cramer, M. D. Source and Sink Physiology. In Moore, P. H.; Botha, F. C. (eds.). *Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology*. Oxford: Willey Blackwell. 2014. Cap.18, p.483-520. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch18>
- Wiedenfeld, R. P. Water stress during different sugar cane growth periods on yield and response to N fertilizer. *Agriculture Water Management*, v.43, p.173-182, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00053-0)
- Yousaf, M. I.; Riaz, M. W.; Shehzad, A.; Jamil, S.; Shahzad, R.; Kanwal, S.; Ghani, A.; Ali, F.; Abdullah, M.; Ashfaq, M.; Hussain, Q. Responses of maize hybrids to water stress conditions at different developmental stages: accumulation of reactive oxygen species, activity of enzymatic antioxidants and degradation in kernel quality traits. *PeerJ*, v.11, e14983, 2013. <https://doi.org/10.7717/peerj.14983>