

## Trocas gasosas, desenvolvimento radicular e produção de biomassa em acessos do complexo *Saccharum* sob supressão hídrica



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Tabuleiros Costeiros  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

**BOLETIM DE PESQUISA  
E DESENVOLVIMENTO  
162**

Trocas gasosas, desenvolvimento radicular  
e produção de biomassa em acessos do  
complexo *Saccharum* sob supressão hídrica

*Anderson Carlos Marafon  
Lizz Kezzy de Moraes  
Tassiano Maxwell Marinho Câmara  
Victor dos Santos Guimarães  
Jonas Paulino dos Santos*

**Embrapa Tabuleiros Costeiros**  
Aracaju, SE  
2021

**Embrapa Tabuleiros Costeiros**  
Avenida Governador Paulo Barreto de Menezes,  
nº 3250, CEP 49025-040, Aracaju, SE  
Fone: +55 (79) 4009-1300  
www.embrapa.br  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pelo conteúdo e edição:

**Embrapa Tabuleiros Costeiros**

Comitê Local de Publicações  
da Unidade Responsável

Presidente  
*Ronaldo Souza Resende*

Secretário-Executivo  
*Ubiratan Piovezan*

Membros  
*Amaury da Silva dos Santos*  
*Ana da Silva Lédo*  
*Anderson Carlos Marafon*  
*Joézio Luiz dos Anjos*  
*Julio Roberto Araujo de Amorim*  
*Lizz Kezzy de Moraes*  
*Luciana Marques de Carvalho*  
*Tânia Valeska Medeiros Dantas*  
*Viviane Talamini*

Supervisão editorial e editoração eletrônica  
*Aline Gonçalves Moura*

Normalização bibliográfica  
*Josete Cunha Melo*

Projeto gráfico da coleção  
*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Foto da capa  
*Anderson Carlos Marafon*

**1ª edição**  
Publicação digital - PDF (2021)

#### **Todos os direitos reservados**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,  
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Tabuleiros Costeiros

---

Trocas gasosas, desenvolvimento radicular e produção de biomassa em acessos do complexo  
*Saccharum* sob supressão hídrica / Anderson Carlos Marafon ... [et al.] . – Aracaju :  
Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2021.

39 p. : il. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Tabuleiros Costeiros,  
ISSN 1678-1961; 162)

1. Cana de açúcar. 2. Saccharum. 3. Deficiência hídrica. 4. Biomassa. I.  
Marafon, Anderson Carlos. II. Moraes, Lizz Kezzy de. III. Câmara, Tassiano  
Maxwell Marinho. IV. Guimarães, Victor dos Santos. V. Santos, Jonas Paulino dos.  
VI. Série.

CDD (21. Ed.) 633.61

## Sumário

---

Resumo .....	5
Abstract .....	7
Introdução.....	8
Material e Métodos .....	10
Resultados e Discussão .....	15
Conclusões.....	35
Referências .....	36



## Trocas gasosas, desenvolvimento radicular e produção de biomassa em acessos do complexo *Saccharum* sob supressão hídrica

Anderson Carlos Marafon<sup>1</sup>

Lizz Kezzy de Moraes<sup>2</sup>

Tassiano Maxwell Marinho Câmara<sup>3</sup>

Victor dos Santos Guimarães<sup>4</sup>

Jonas Paulino dos Santos<sup>5</sup>

**Resumo** – O objetivo deste trabalho foi caracterizar dez acessos do Complexo *Saccharum* quanto à tolerância à deficiência hídrica perante a avaliação de trocas gasosas, produção de biomassa e do desenvolvimento radicular durante a fase formativa de crescimento das plantas. Foram avaliados dois tratamentos: 1 - testemunha (irrigado) e 2 - supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio. Foram determinadas, a cada 48 h, as taxas de transpiração, condutância estomática e de fotossíntese. As produções de biomassa seca da parte aérea e das raízes, bem como a densidade de comprimento de raízes foram determinadas após o término dos tratamentos hídricos. As maiores capacidades de manutenção das trocas gasosas foram constatadas para os acessos Khajuria (*S. officinarum*) e IJ 76-361 para transpiração, Khajuria, Fiji\_15 e Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.) para condutância estomática e Khajuria e SP 791011 (*S. officinarum*) para fotossíntese. Sob supressão hídrica, os acessos Fiji\_15, SP 791011, US 72 1319 (*S. spontaneum*), IJ 76-381, IJ 76-358 (*E. arundinaceus*) apresentaram maiores produções de biomassa seca da parte aérea e os acessos IJ 76-358, IJ 76-381, Fiji\_15, IJ 76-414 e US 72 1319 apresentaram maiores produções de biomassa seca de raízes.

---

<sup>1</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Fisiologia Vegetal, pesquisador da Unidade de Execução de Pesquisa de Rio Largo (UEP - Rio Largo) da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Rio Largo, AL.

<sup>2</sup> Engenheira-agrônoma, doutora em Genética e Melhoramento Vegetal, pesquisadora da Unidade de Execução de Pesquisa de Rio Largo (UEP - Rio Largo) da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Rio Largo, AL.

<sup>3</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento Vegetal, pesquisador da Unidade de Execução de Pesquisa de Rio Largo (UEP - Rio Largo) da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Rio Largo, AL.

<sup>4</sup> Estudante de pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Rio Largo, AL.

<sup>5</sup> Estudante de graduação em Agronomia, Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Rio Largo, AL.

A deficiência hídrica provocou reduções significativas nas densidades de comprimento de raízes dos acessos IJ 76-358, IJ 76-381, Fiji\_15, SP 791011 e NG 57-024 (*S. robustum*).

**Termos para indexação:** Tolerância à seca, cana-de-açúcar, *Erianthus*, *Miscanthus*, raízes, parte aérea.

## Gas exchange, root development and biomass production in *Saccharum* Complex accessions under water suppression

**Abstract** – The high biomass potential of energetic grasses, like *Saccharum* complex species, even in restrictive environments in terms of water and nutrients, depend on the physiological characteristics of the genotypes, essentially, through the adjustment of their gas exchange and the development of the root system. This work aims to characterize ten accessions of the *Saccharum* Complex in terms of tolerance to water deficiency regarding the assessment of gas exchange, biomass production and root development during the plant growth formative phase. Two treatments were evaluated: 1 - control (irrigated) and 2 - water suppression from 90 to 106 days after planting. Transpiration, stomatal conductance and photosynthesis rates were determined every 48 h. The aerial part and roots dry biomass production, and the root length density were determined after the end of the hydric treatments. The greatest resources for maintaining gas exchange were found for the accessions Khajuria and IJ 76-361 (*S. officinarum*) for transpiration, Khajuria, Fiji\_15 and Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.) for stomatal conductance and Khajuria (*S. officinarum*) and SP 791011 for photosynthesis. Under water suppression, the accessions Fiji\_15, SP 791011, IJ 76-381, US 72 1319 and IJ 76-358 showed higher yields of aerial part dry biomass and the accessions Fiji\_15, SP 791011, US 72 1319 (*S. spontaneum*) IJ 76-381 and IJ 76-358 (*E. arundinaceus*) showed higher production of dry root biomass. Water deficiency caused significant reductions in root length densities of accessions IJ 76-358, IJ 76-381, Fiji\_15, SP 791011 and NG 57-024 (*S. robustum*).

**Index terms:** Drought tolerance, sugarcane, *Erianthus*, *Miscanthus*, roots, aerial part.

## Introdução

---

O “Complexo *Saccharum*”, que tem na cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) seu principal representante cultivado comercialmente, constitui um grupo de plantas intercruzáveis formado pelos gêneros *Saccharum*, *Erianthus* (divisão Ripidium), *Miscanthus* (divisão Diandra), *Narenga* e *Sclerostachya* (Amalraj; Balasundaram, 2005). O gênero *Saccharum* possui seis espécies, sendo duas silvestres: *S. spontaneum* e *S. robustum*; e quatro cultivadas: *S. officinarum*, *S. barberi*, *S. sinensis*, e *S. edule*. As variedades modernas de cana-de-açúcar são derivadas principalmente do cruzamento interespecífico entre *S. spontaneum* e *S. officinarum*, com predominância (cerca de 80% do genoma) do material genético oriundo de *S. officinarum* (Herry; Kole, 2010), que é resultante de uma complexa integração entre *S. spontaneum*, *Erianthus arundinaceus* e *Miscanthus sinensis* (Daniels; Roach, 1987).

Grande parte do melhoramento genético na cana-de-açúcar veio da introgressão de genes com espécies silvestres, especialmente *Saccharum spontaneum* (Tew; Cobill, 2008; Ming et al., 2006). Contudo, outros cruzamentos de cana-de-açúcar com seus parentes selvagens têm sido realizados visando a tolerância ao frio, doenças e/ou insetos e aumento de produtividade de biomassa, entre outros (Cai et al., 2005; Kar et al., 2019). A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima utilizada para a produção de bioenergia, especialmente nas regiões tropicais e regiões subtropicais do mundo, onde é melhor adaptada devido à sua elevada eficiência fotossintética (via ciclo C4), que proporciona alto rendimento de biomassa renovável para produção de açúcar e energia, sem competir diretamente com outras culturas alimentares (Surendra et al., 2018).

O interesse global pelo cultivo da cana-de-açúcar aumentou significativamente nos últimos anos devido ao seu impacto econômico na produção sustentável de açúcar e de bioenergia. Para potencializar o uso energético da biomassa de cana, programas de melhoramento têm direcionado linhas de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de acessos mais eficientes no uso da água e tolerantes ao estresse hídrico, com elevada produção de biomassa, rusticidade e adaptabilidade a áreas marginais ou ambientes de produção mais restritivos (Ferreira et al., 2017).

O déficit hídrico tem maior impacto sobre a produtividade da cana-de-açúcar na fase formativa de desenvolvimento da planta (perfilhamento e rápido crescimento), com expressiva demanda hídrica (entre 60 e 150 mm) após o plantio (Ramesh, 2000). Quando a fase formativa do desenvolvimento coincide com um período seco e quente com alta demanda atmosférica por vapor d'água por parte da planta e disponibilidade inadequada de água no solo, tem-se a mortalidade de perfilhos o que resulta em baixos estandes de cultivo. Estimativas recentes indicam ocorrências de drásticas reduções na produção de cana-de-açúcar (superiores à 50%), como resultado de eventos de déficit hídricos prolongados ocorridos durante o ciclo da cultura (Carvalho et al., 2015).

A tolerância à seca implica na capacidade da planta em suportar a restrição hídrica sem sofrer injúrias significativas à planta e sem decréscimo de produtividade. Essa aptidão da planta em enfrentar o ambiente desfavorável envolve o ajustamento osmótico pela acumulação de solutos, mudanças na elasticidade da parede celular e mudanças morfológicas (Lopes; Lima, 2015). As plantas desenvolveram várias estratégias de tolerância contra ao déficit hídrico, dentre elas: mudanças no ciclo cultural, evolução da percepção do sinal de estresse para expressão de longo prazo de tolerância ao estresse, modulação do desenvolvimento para combinar com o abastecimento de água e a regulação de todas as funções da planta para equilibrar a alocação de recursos para a adaptação ao ambiente de escassez hídrica (Hu; Xiong, 2014). Alterações morfológicas e fisiológicas em função do déficit hídrico podem indicar mecanismos de tolerância à seca visando aumentar a eficiência no uso da água como: ajustamento osmótico, aumento na atividade do sistema antioxidativo e robustez do sistema radicular (Cavatte et al., 2011).

As tecnologias empregadas em pesquisas de fenotipagem de plantas, dentre elas o uso de minirizotrons para estudo sobre o sistema radicular, são extremamente relevantes do ponto de vista agrônomo por contribuem para a maior eficiência na seleção de genótipos adaptados à diferentes condições edafoclimáticas (Bucksch et al., 2014).

A distribuição em profundidade e a velocidade de crescimento das raízes são fatores intimamente ligados à espécie ou acesso, à idade da planta, às condições físico-químicas do solo. O sistema radicular da cana-de-açúcar é influenciado pelo genótipo e pela umidade do solo, sendo que, maiores

superfícies absorptivas de raízes conferem maior tolerância das plantas ao déficit hídrico, dependendo de sua taxa transpiratória (Vasconcelos, 2002). Neste sentido, o conhecimento do desenvolvimento radicular é fundamental para se compreender os processos de absorção de água e nutrientes (Smith; Inman-Bamber; Thorburn, 2005), os quais estão intimamente ligados ao crescimento da cana-de-açúcar e à previsão de safras da cultura (Wu; Cheng, 2014).

A caracterização de acessos quanto a tolerância à seca contribui para a formação de banco de dados para subsidiar ações de melhoramento genético da cana-de-açúcar no desenvolvimento de cultivares mais produtivas e melhor adaptadas em ambientes de produção restritivos. Neste sentido, o objetivo deste estudo foi caracterizar dez acessos do complexo *Saccharum* quanto à tolerância ao déficit hídrico do solo por meio da avaliação de trocas gasosas, do desenvolvimento radicular e da produção de biomassa de raízes e da parte aérea das plantas na fase formativa de desenvolvimento.

## Material e Métodos

---

### Condições experimentais e material vegetal

O experimento foi implantado no mês de novembro de 2018 e conduzido sob condições controladas (casa de vegetação) na Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa Tabuleiros Costeiros, no município de Rio Largo, Alagoas, cujas coordenadas geográficas são 09°28'02" (Latitude), 35°49'38" (Longitude).

Foram avaliados dez acessos pertencentes à três gêneros do Complexo *Saccharum*: 1) EA - IJ 76-358 (*Erianthus arundinaceus*); 2) EA - IJ 76-381 (*E. arundinaceus*); 3) MI - Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.); 4) MI - Fiji\_15 (*Miscanthus* sp.); 5) SO - SP 791011 (*Saccharum officinarum*); 6) SO - IJ 76-361 (*S. officinarum*); 7) SO - Khajuria (*S. officinarum*); 8) SR - IJ 76-414 (*S. robustum*); 9) SR - NG 57-024 (*S. robustum*) e 10) SS - US 721319 (*S. spontaneum*). O material foi proveniente do Banco Ativo de Germoplasma da Embrapa Tabuleiros Costeiros, instalado no campo experimental Jorge do Prado Sobral, no município de Nossa Senhora das Dores, SE (10°20'S e 37°10'W).

A multiplicação das mudas foi realizada por mini toletes (uma gema) em bandejas contendo substrato, as quais foram transplantadas aos 30 dias após o plantio para vasos de 100 litros (duas mudas por vaso) contendo substrato constituído por solo e areia lavada (1:1), com textura areno-argilosa (75% areia, 5% silte e 20% argila) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Atributos do substrato utilizado no experimento. Rio Largo, AL, 2021.

Nutrientes minerais				Atributos químicos			
mg dm <sup>-3</sup>		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>		%			
K	P	Ca	Mg	CTCe*	m	V	MO
261	1234	5,24	1,47	8,8	0,82	82	3,58

\*CTCe= capacidade de troca de cátions efetiva, m= índice de saturação de alumínio, V= saturação por bases e MO= matéria orgânica.

Os tratamentos consistiram em dois regimes hídricos: 1 - testemunha (irrigado) e 2 - supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio (DAP). O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas e três repetições. As parcelas foram representadas pelos regimes hídricos (testemunha e supressão hídrica) e as subparcelas pelos dez acessos (Figura 1).



Foto: Anderson C. Marafon

**Figura 1.** Experimento com acessos do complexo *Saccharum* submetidas à supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio.

O turno de rega do tratamento controle (irrigado) consistiu na reidratação do substrato a cada dois dias, cuja umidade foi mantida próxima à capacidade de campo (20% para este substrato), a partir do acompanhamento do teor de umidade do substrato com auxílio de uma sonda de perfil modelo PR2 (Delta-T Devices) (Figura 2).



**Figura 2.** Sonda de perfil para monitoramento da umidade do solo.

Nos vasos submetidos à supressão hídrica, houve gradativa redução da umidade, a qual passou de 21,7% na data de imposição dos tratamentos (90 DAP) para 9,3% aos 16 dias após a supressão de água (Tabela 2).

**Tabela 2.** Umidade média do substrato (%) nos tratamentos testemunha (irrigado) e supressão hídrica. Rio Largo, AL, 2021.

Dias de tratamento	Testemunha Umidade (%)	Supressão hídrica Umidade (%)
0	22,1	21,7
2	21,7	17,1
4	20,9	15,5
6	20,1	13,9
8	19,6	12,3
10	18,8	10,8
12	18,9	9,6
14	19,5	8,9
16	19,7	8,3

Durante o período experimental foram registradas médias de 29,1 °C para temperatura e de 75,4% para umidade relativa do ar. Os dados meteorológicos foram registrados por uma estação automática (Delta-T Devices).

## Avaliação das trocas gasosas

Foram efetuadas avaliações das trocas gasosas (fotossíntese, condutância estomática e transpiração) na data de imposição dos tratamentos (90 DAP) e aos 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 16 dias após a supressão hídrica (DASH). As medições foram realizadas no horário entre 07:00 e 09:30 h, avaliando-se a folha +3 (terceira folha, à partir do ápice da planta, completamente expandida e com a lígula visível). Foi utilizado um sistema portátil compacto de fluxo aberto para medição das trocas gasosas (Infrared Gas Analyzer – IRGA) modelo LCi – SD (ADC BioScientific), dotado de fonte de luz ( $Q = 1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) sendo determinadas: (1) transpiração (E), em milimols de água por metro quadrado por segundo ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), (2) condutância estomática (gs), em mols de água por metro quadrado por segundo ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e (3) fotossíntese líquida (A), em micromols de gás carbônico por metro quadrado por segundo ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

## **Produção de biomassa seca e relação raiz: parte aérea**

Ao término das avaliações fisiológicas (106 DAP) foi efetuado o corte da parte aérea e a retirada e a lavagem das raízes. Todo o material vegetal foi submetido à secagem em estufa por 48h a 105 °C, ou até peso constante, sendo posteriormente pesado em balança analítica de precisão para determinação das produções de biomassa seca da parte aérea (BSPA) e de biomassa seca de raízes (BSR), expressas em gramas de matéria seca por vaso ( $\text{g vaso}^{-1}$ ). A partir dos valores da BSR e da BSPA foi calculada a relação raiz:parte aérea (R:PA).

## **Densidade de comprimento de raízes**

O estudo do desenvolvimento das raízes foi realizado pelo método do minirizotron (Rewald; Ephrath, 2013). Aos 106 DAP foram capturadas imagens do sistema radicular dos acessos a partir de sua inserção de um scanner de raízes (CID Bio-Science, Modelo CI-601) em tubos de acrílico transparentes (previamente instalados) na profundidade de 0 a 40 cm da superfície do solo. O tubo foi previamente inserido no vaso juntamente com o substrato de plantio, a 25 cm de distância das mudas, na vertical (em ângulo de 45°). Com base no comprimento total de raízes (mm) e no tamanho da imagem do scanner ( $422,5 \text{ cm}^2$ ) calculou-se a densidade de comprimento de raízes (DCR), cujos resultados foram expressos em milímetros por centímetro quadrado ( $\text{mm cm}^{-2}$ ).

## **Análises estatísticas**

Os resultados das avaliações de trocas gasosas (A, E e gs) foram comparados entre datas de avaliação (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 16 DASH) para cada acesso e entre acessos para cada tratamento (irrigado e supressão). A densidade de comprimento de raízes, a produção de biomassa seca da parte aérea e de raízes e a relação raiz:parte aérea aos 106 DAP foram comparados entre os regimes hídricos dentro de cada acesso e entre acessos dentro de cada regime hídrico. Os dados obtidos foram submetidos à análise da variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ), através do programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2011).

## Resultados e Discussão

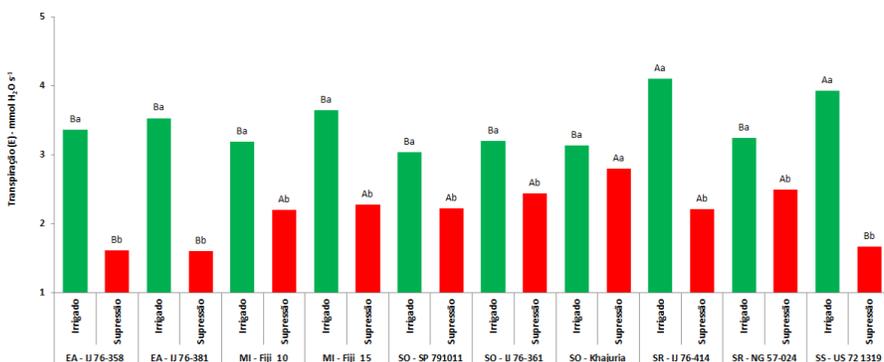
---

A supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio (DAP) ocasionou reduções significativas ( $p \leq 0,05$ ) nas taxas de fotossíntese (A), condutância estomática (gS) e transpiração E), com diferenças entre acessos em função dos diferentes regimes hídricos. Além disso, os valores da densidade de comprimento de raízes e das produções de biomassa seca da parte aérea e das raízes apresentaram diferenças significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre acessos dentro de cada regime hídrico e entre esses para o mesmo acesso.

### Trocas gasosas

Foram constatadas diferenças significativas entre acessos e tratamentos (regimes hídricos) ao longo das datas de avaliação para as variáveis transpiração (E), atividade fotossintética (A) e condutância estomática (gs). Todos os acessos apresentaram taxas médias de E, gs e A significativamente superior no tratamento supressão hídrica em relação ao tratamento controle (irrigado), exceto o acesso Khajuria (*S. officinarum*).

Os acessos US 721319 (*S. spontaneum*) e IJ 76-414 (*S. robustum*) apresentaram maiores taxas de E em relação aos demais acessos no tratamento testemunha (irrigado) e, os acessos US 721319, IJ 76-358 (*E. arundinaceus*) e IJ 76-361 (*S. officinarum*) apresentaram taxas de E inferiores aos demais materiais sob supressão hídrica. As reduções mais significativas nas taxas de E foram observadas nos acessos de *E. arundinaceus* (IJ 76-358 e IJ 76-381) e *S. spontaneum* (US 721319) (Figura 3).



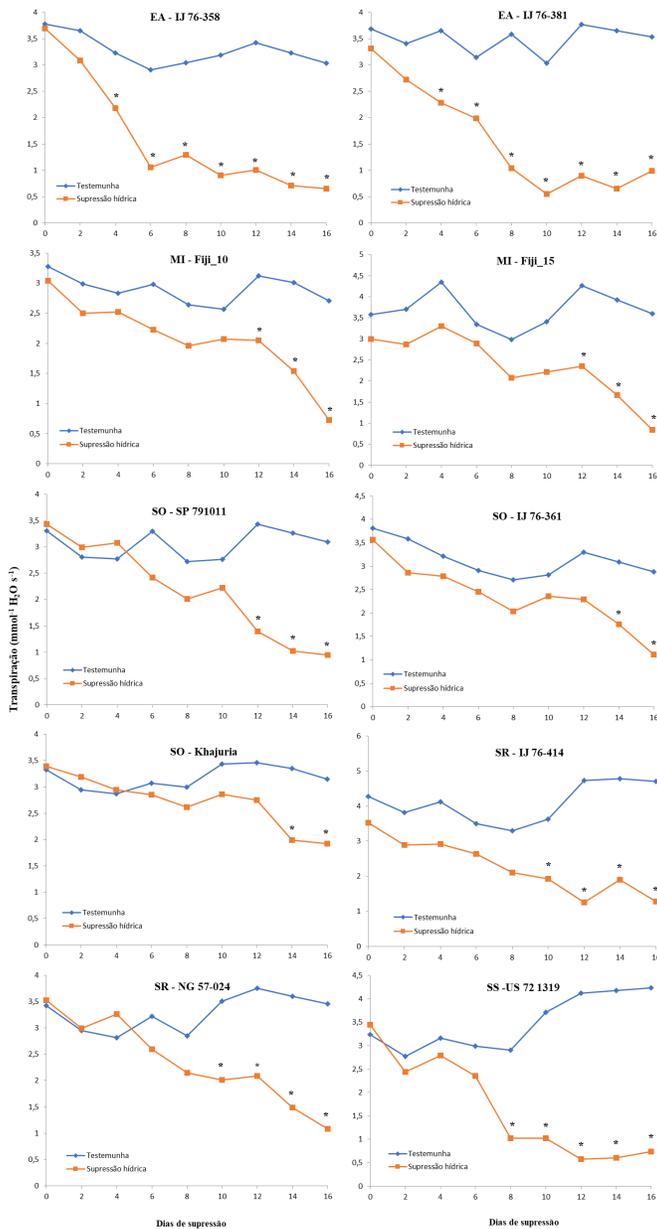
**Figura 3.** Transpiração média em acessos do complexo *Saccharum* sob irrigação plena e submetidas à supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio. Rio Largo, AL, 2021.

\*Letras maiúsculas distintas entre variedades dentro de cada tratamento ou minúsculas distintas entre tratamentos dentro da mesma variedade diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

As plantas requerem grandes quantidades de água e apresentam elevada demanda evaporativa para seu crescimento, havendo fortes correlações positivas entre conteúdo de água transpirado, carbono assimilado e biomassa produzida. Durante o crescimento, cerca de 97% da água absorvida pela planta se perde via transpiração, outros 2% são utilizados para sustentar o crescimento através da turgescência e hidratação celular e apenas 1% é assimilado por processos metabólicos (incluindo a fotossíntese) e de formação de esqueletos carbônicos (Lakshmanan; Robinson, 2014).

O déficit hídrico se desenvolve quando a absorção de água é menor do que a transpiração da planta, com fechamento total ou parcial dos estômatos. No momento em que a taxa transpiratória excede a taxa de absorção de água, o vegetal está sob déficit hídrico – situação na qual as suas células e os seus tecidos perdem a sua turgescência plena. As plantas tolerantes ao déficit hídrico conseguem manter sua turgescência celular através do ajustamento osmótico, decorrente do acúmulo intracelular de compostos orgânicos, como sacarose e aminoácidos (dentre eles a prolina), que diminuem o potencial hídrico sem prejudicar muito significativamente o metabolismo da planta. Sem reposição de água no solo ou alguma redução na demanda transpiratória por intermédio da redução da área foliar e/ou do fechamento estomático, a planta sofre danos irreparáveis ocasionados pela dessecação interna dos seus tecidos (Lopes; Lima, 2015).

As taxas de E dos acessos IJ 76-358 e IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) submetidas à supressão hídrica apresentaram reduções a partir dos 4 dias após a supressão hídrica (DASH), sendo os mais afetados pela restrição de água nesta fase. Estas taxas foram significativamente inferiores nas plantas submetidas à supressão hídrica a partir dos 8 DASH no acesso US 72 1319 (*S. spontaneum*), dos 10 DASH nos acessos IJ 76-414 e NG 57-024 (*S. robustum*), dos 12 DASH nos acessos SP 791011 (*S. officinarum*), Fiji\_15 e Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.) e dos 14 DASH nos acessos Khajuria e IJ 76-361 (*S. officinarum*). Os acessos Khajuria e IJ 76-361 apresentaram maior capacidade de manutenção das suas taxas de transpiração (E) sob regime de escassez hídrica do solo, ao passo que, os acessos IJ 76-358 e IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) apresentaram suas taxas de E muito mais afetadas pela seca (Figura 4).



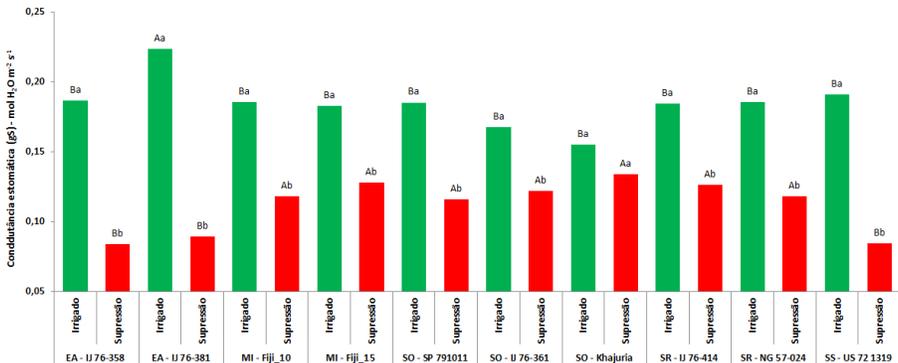
**Figura 4.** Transpiração em acessos do complexo *Saccharum* submetidas à supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio. Rio Largo, AL, 2021.

\*Tratamentos diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

Considerando a manutenção da E ao longo do período de supressão hídrica como uma característica indicativa da tolerância das plantas à deficiência hídrica, os acessos Khajuria e IJ 76-361 foram os que mantiveram suas taxas de E semelhantes ao tratamento controle (irrigado) por mais tempo (14 DASH), seguidos pela variedade SP 791011 (*S. officinarum*) e pelo acesso Fiji\_15 (*Miscanthus* sp.), os quais mantiveram suas taxas de E durante 12 DASH. Por outro lado, os acessos IJ 76-358 e IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) foram os mais afetados pela restrição de água, apresentando drástica redução aos 4 DASH, em comparação ao tratamento controle.

Nable et al. (1999) verificaram reduções nas taxas transpiratórias em sorgo e cana-de-açúcar, sempre que a fração de água disponível no solo decrescia. As respostas mais comuns ao estresse hídrico em cana-de-açúcar são: enrolamento de folhas, fechamento estomático, inibição do crescimento dos colmos (redução no tamanho dos entrenós) e da folha, senescência foliar e redução da área foliar (Inman-Bamber; Smith, 2005; Inman-Bamber et al., 2012). Além disso, a divisão celular e o alongamento celular são interrompidos e o alongamento do caule e da folha são os processos de crescimento mais seriamente afetados (Machado et al., 2009).

O acesso IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) apresentou a maior taxa média de condutância estomática (gs) em condições ideais de umidade do solo, enquanto os acessos US 721319 (*S. spontaneum*), IJ 76-358 e IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) apresentaram taxas de gs inferiores aos demais materiais sob condições de supressão hídrica. As reduções mais significativas nas taxas de gs foram observadas nos acessos de *E. arundinaceus* (IJ 76-358 e IJ 76-381) e *S. spontaneum* (US 711319). O acesso IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) foi o que apresentou a maior taxa média de condutância estomática (gs) em condições ideais de umidade do solo, embora tenha apresentado taxas de gs inferiores aos demais materiais sob condições de supressão hídrica, juntamente com os acessos US 721319 (*S. spontaneum*) e IJ 76-358 (*E. arundinaceus*), o que reflete que estes três acessos são os mais os que apresentam menor capacidade de manutenção da gs em função da supressão de água no solo (Figura 5).



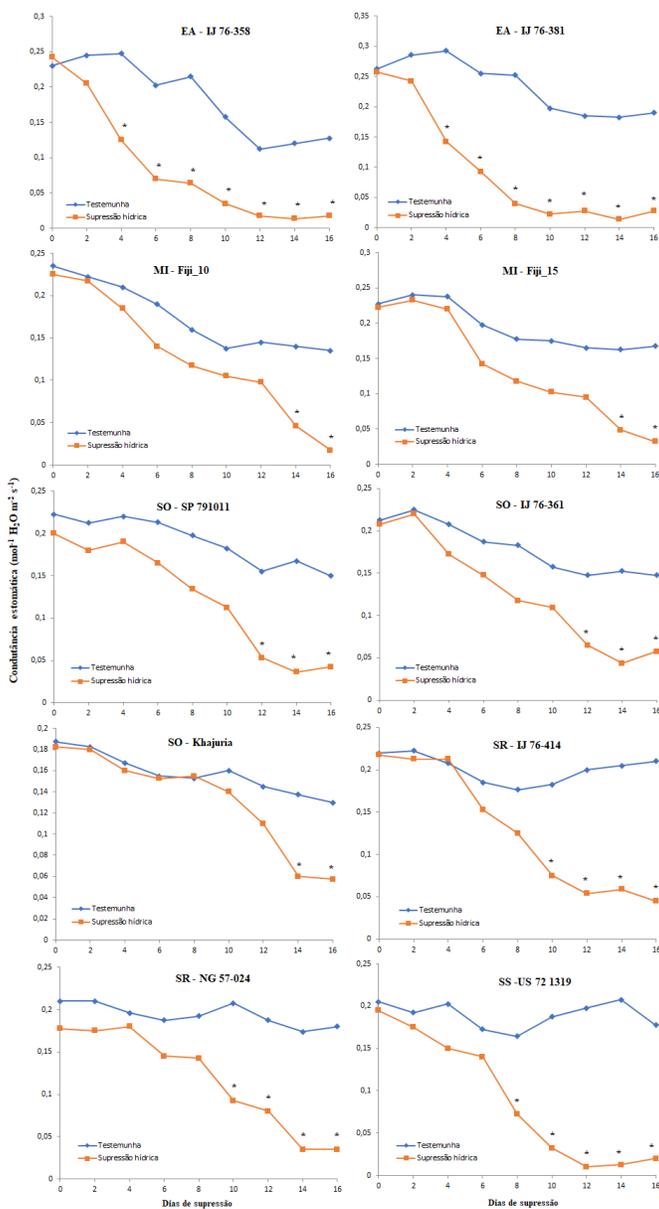
**Figura 5.** Condutância estomática média em acessos do complexo *Saccharum* submetidas à supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio. Rio Largo, AL, 2021.

\*Letras maiúsculas distintas entre variedades dentro de cada tratamento ou minúsculas distintas entre tratamentos dentro da mesma variedade diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

À medida que diminui o potencial da água no solo, com a secagem, a resistência ao fluxo de água para a rizosfera é aumentada, alargando-se o gradiente de potencial hídrico entre o solo e o sistema radicular, fazendo com que as raízes não consigam manter um adequado suprimento de água (Bergonci; Pereira, 2002). A abertura dos estômatos representa o local de controle e de menor resistência ao fluxo de água da planta na forma de vapor. O estresse hídrico causa severa inibição no processo fotossintético por efeitos estomáticos e não estomáticos. O efeito estomático é um evento primário, que contribui notavelmente para reduzir as perdas de água durante limitada disponibilidade e/ou alta demanda evaporativa, o que leva à menor disponibilidade de CO<sub>2</sub> nos espaços intercelulares, reduzindo sua assimilação pelos cloroplastos. Já o efeito não estomático está relacionado às alterações nos processos fotoquímicos como a redução no transporte de elétrons, afetando a formação de ATP e NADPH, e nos processos bioquímicos com a redução na eficiência carboxilativa e na atividade das enzimas do metabolismo fotossintético (Taiz et al., 2017).

A secagem do solo aumenta o pH da seiva do xilema de 6,1 para 6,7, promovendo o fechamento dos estômatos e redução do crescimento (Wilkinson; Davies, 1997). A senescência foliar também é responsiva à deficiência hídrica, principalmente na fase de alongamento dos colmos, com redução no número de folhas verdes e consequentemente na área foliar (Smit; Singels, 2006).

As taxas de condutância estomática (gs) foram inferiores nas plantas submetidas à supressão de água aos 4 DASH nos acessos IJ 76-358 e IJ 76-381 (*E. arundinaceus*), aos 8 DASH no acesso US 72-1319 (*S. spontaneum*), aos 10 DASH nos acessos IJ 76-414 e NG 57-024 (*S. robustum*), aos 12 DASH no acesso RB 791011 e no acesso IJ 76-361 (*S. officinarum*) e aos 14 dias nos acessos Khajuria (*S. officinarum*), Fiji\_15 e Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.). Os acessos Khajuria (*S. officinarum*), Fiji\_15 e Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.) apresentaram maior manutenção das suas taxas de condutância estomática (gs) sob regime de supressão hídrica com deficiência de água no solo. Por outro lado, IJ 76-358 e IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) foram os que apresentaram maiores reduções nas taxas de gs com o ressecamento do solo. Considerando que a manutenção da taxa de gs ao longo do período de supressão hídrica seja uma característica indicativa da tolerância das plantas à deficiência hídrica, as reduções na gs foram observadas mais tardiamente (14 DASH) nos acessos Khajuria (*S. officinarum*), Fiji\_15 e Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.) em relação aos demais acessos. Por outro lado, as reduções nas taxas de gs foram mais drásticas (4 DASH) nos acessos IJ 76-358 e IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) (Figura 6).

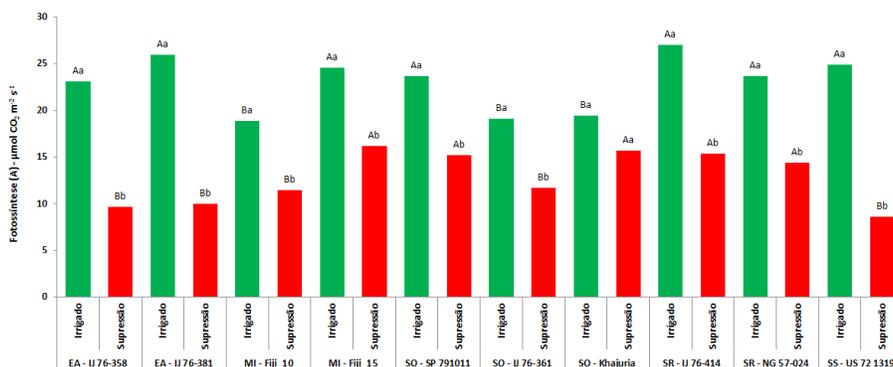


**Figura 6.** Condutância estomática (gs) em acessos do complexo *Saccharum* submetidas à supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio. Rio Largo, AL, 2021.

\*Tratamentos diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Plantas com maior tolerância à deficiência hídrica produzem folhas novas com maior densidade estomática, porém, com estômatos menores, o que aumenta a resistência à movimentação do ar da camada imediatamente adjacente à epiderme foliar e evita danos às trocas gasosas, ou seja, há diminuição da perda de água sem impedir que a absorção de CO<sub>2</sub> siga ocorrendo (Larcher, 2004). Clifton-Brown et al. (2002) relataram os efeitos da redução da disponibilidade de água no crescimento de três genótipos de *Miscanthus*, associados com maior permanência de folhas verdes (stay-green) e de um rígido controle da transpiração por meio da redução da condutância estomática foliar.

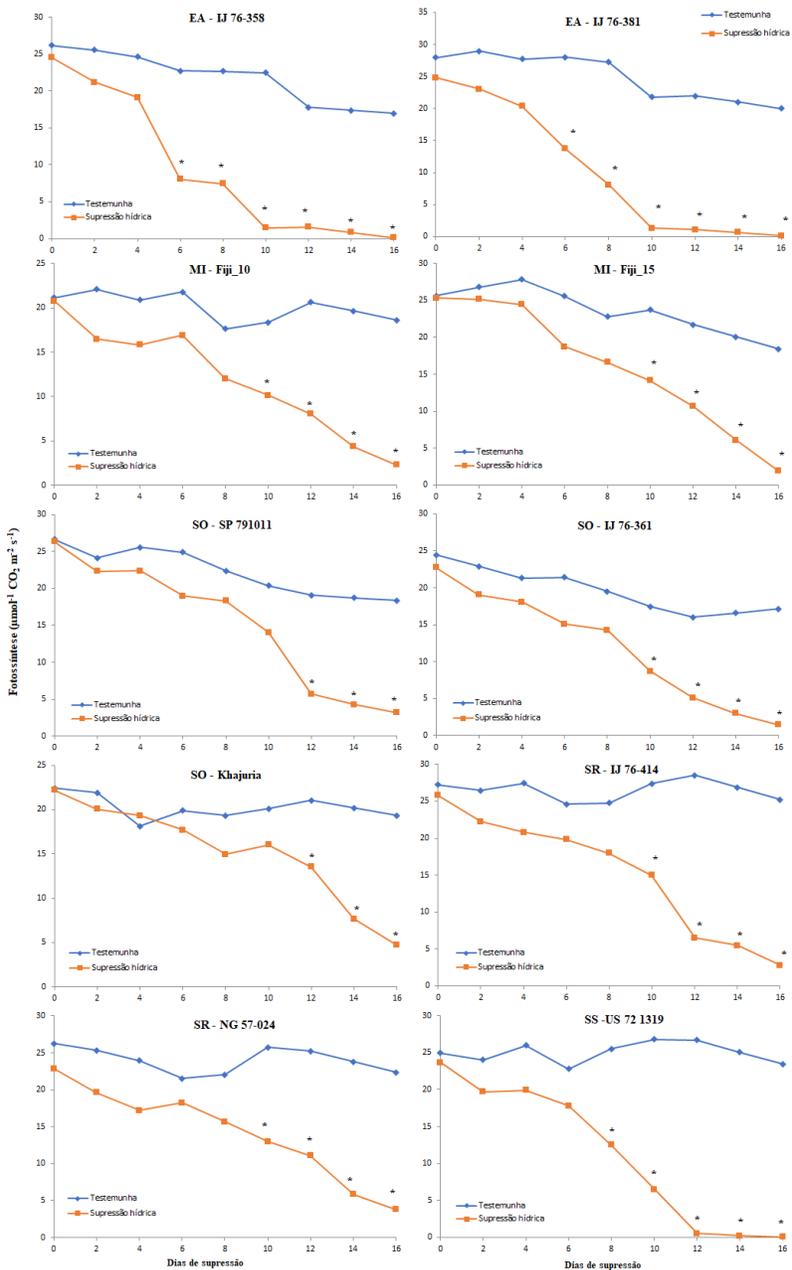
Os acessos IJ 76-358, IJ 76-381 (*E. arundinaceus*), Fiji\_15 (*Miscanthus* sp), SP 791011 (*S. officinarum*), IJ 76-414, NG 54-024 (*S. robustum*) e US 721319 (*S. spontaneum*) apresentaram taxas de A superiores aos demais acessos sob condições ideais de umidade do solo (tratamento controle). Já os acessos Fiji\_15 (*Miscanthus* sp), SP 791011, Khajuria (*S. officinarum*), IJ 76-414 e NG 54-024 (*S. robustum*) apresentaram taxas fotossíntese líquida (A) superiores aos demais acessos no tratamento sob condições de supressão hídrica. Já, os acessos Khajuria, IJ 76-361 (*S. officinarum*) e Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.) apresentaram taxas de A inferiores aos demais acessos no tratamento testemunha (irrigado). As reduções mais significativas nas taxas de A foram observadas nos acessos de *E. arundinaceus* (IJ 76-358 e IJ 76-381) e *S. spontaneum* (US 711319) (Figura 7).



**Figura 7.** Fotossíntese média em acessos do complexo *Saccharum* submetidas à supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio. Rio Largo, AL, 2021.

\*Letras maiúsculas distintas entre variedades dentro de cada tratamento ou minúsculas distintas entre tratamentos dentro da mesma variedade diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Considerando a manutenção da A ao longo do período de supressão hídrica como uma característica indicativa da tolerância das plantas à deficiência hídrica, os acessos SP 791011 e Khajuria (*S. officinarum*) foram as que apresentaram maior capacidade de manutenção das taxas de A (12 DASH). Por outro lado, os acessos IJ 76-358 e IJ 76-381 foram os que tiveram suas taxas de A mais afetadas pela supressão hídrica (6 DASH). As taxas de A foram inferiores nas plantas submetidas à supressão de água em relação ao tratamento controle aos 6 DASH nos acessos IJ 76-358 e IJ 76-381, aos 8 DASH no acesso US 72 1319 (*S. spontaneum*), aos 10 DASH nos acessos Fiji\_15 e Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.) e aos 12 DASH na variedade SP 791011 e no acesso Khajuria (*S. officinarum*), cujos materiais foram os que apresentaram maior capacidade de manutenção das taxas de A sob supressão hídrica enquanto os acessos IJ 76-358 e IJ 76-381 foram os mais afetados (Figura 8).



**Figura 8.** Fotossíntese em acessos do complexo *Saccharum* submetidas à supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio. Rio Largo, AL, 2021. \*Tratamentos diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

As respostas da fotossíntese em decorrência do déficit hídrico são dependentes da espécie, sendo que o declínio da atividade fotossintética se dá paralelamente com a diminuição do volume celular e, portanto, conjuntamente com a redução na turgescência (Larcher, 2004). No início do período de seca ocorre redução na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> devido ao declínio na pressão do turgor das células-guarda dos estômatos, que ocasiona o seu fechamento total ou parcial. Por isso, espécies tolerantes à seca conseguem controlar a função estomática e melhorar a eficiência no uso da água, permitindo a fixação de carbono mesmo em períodos de restrição hídrica (Yordanov et al., 2003).

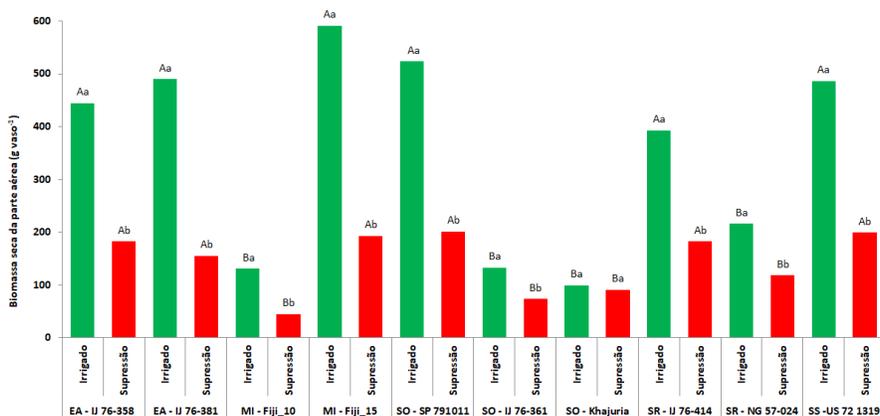
Em situação inicial de déficit hídrico, a perda da capacidade fotossintética se dá, principalmente, por limitação estomática à difusão do CO<sub>2</sub> para o interior das células. O declínio na taxa fotossintética induzido pelo estresse hídrico é causado principalmente por uma diminuição nas atividades das enzimas fosfoenol piruvato carboxilase (PEPcase) e ribulose 1,5-bifosfato carboxilase (Rubisco) (Lakshmanan; Robinson, 2014). Quando o déficit hídrico é mais severo, o fechamento dos estômatos promove também um desequilíbrio entre a atividade do fotossistema 2 (PSII) e a demanda por elétrons para a fotossíntese, provocando danos ao PSII por fotoinibição (Krause, 1988). Normalmente, a taxa de fotossíntese decresce de forma muito mais acentuada do que a taxa respiratória com o incremento do déficit hídrico no solo, em virtude do efeito primário do fechamento total ou parcial dos estômatos (Lopes; Lima, 2015).

Considerando a capacidade de manutenção das trocas gasosas (E, gs e A) as melhores respostas de tolerância à seca foram constatadas para os acessos Khajuria e IJ 76-361 (*S. officinarum*) para a taxa transpiratória (E), Khajuria (*S. officinarum*), Fiji\_15 e Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.) para a condutância estomática (gs) e Khajuria (*S. officinarum*) e SP 791011 para a taxa de fotossíntese (A). As maiores reduções nas taxas de trocas gasosas (E, gs e A) foram observadas nos acessos de *E. arundinaceus* (IJ 76-358 e IJ 76-381) e de *S. spontaneum* (US 711319).

## **Partição da biomassa entre raízes e parte aérea**

Os acessos apresentaram reduções significativas no acúmulo de biomassa seca da parte aérea (BSPA) em função da restrição hídrica durante a fase

formativa de desenvolvimento (90 aos 106 DAP), exceto o acesso Khajuria (*S. officinarum*). Os acessos que apresentaram os maiores valores para a BSPA, tanto em condições de supressão hídrica quanto em condições de suprimento adequado de água (testemunha irrigada) foram: Fiji\_15 (*Miscanthus* sp.), SP 791011 (*S. officinarum*), IJ 76-381 (*E. arundinaceus*), US 72 1319 (*S. spontaneum*) e IJ 76-358 (*E. arundinaceus*). As maiores diferenças percentuais nas produções de biomassa seca da parte aérea foram constatadas nos acessos Fiji\_15 (206 %), IJ 76-381 (215 %), Fiji\_10 (193 %), SP 791011 (160 %), US 721319 (144 %) e IJ 76-358 (143 %) (Figura 9).



**Figura 9.** Biomassa seca da parte aérea de acessos do complexo *Saccharum* sob diferentes condições de umidade do solo aos 106 dias após o plantio. Rio Largo, AL, 2021.

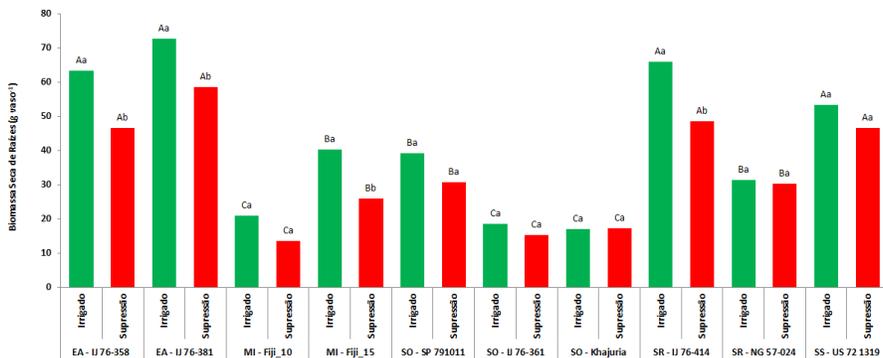
\*letras maiúsculas distintas entre variedades dentro de cada tratamento ou minúsculas distintas entre tratamentos dentro da mesma variedade diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

A susceptibilidade da cana-de-açúcar ao estresse hídrico é maior na fase formativa do desenvolvimento, que envolve o estabelecimento dos perfilhos, o alongamento dos colmos e o início do máximo crescimento vegetativo da planta (Inman-Bamber; Smith, 2005; Machado et al., 2009). Esta fase é considerada a mais crítica em termos de demanda de água da planta por afetar drasticamente a produção final de matéria seca e o rendimento da cultura (Ramesh, 2000). Uma observação importante é de que, sob estresse hídrico, o crescimento da parte aérea (colmos e folhas) da cana-de-açúcar é mais afetado do que o crescimento das raízes (Lakshmanan; Robinson, 2014). Essa característica também foi observada no presente trabalho, visto que a

redução percentual da parte aérea foi maior, em média, do que aquela constatada para as raízes.

A inibição do crescimento foliar induzida pelo estresse hídrico foi relacionada ao aumento do pH do xilema, visto que a secagem do solo aumentou o pH da seiva do xilema de 6,1 para 6,7, promovendo o fechamento dos estômatos e a redução do crescimento (Wilkinson; Davies, 1997). A senescência foliar também é responsiva à deficiência hídrica, principalmente na fase de alongamento dos colmos, com redução no número de folhas verdes e conseqüentemente na área foliar (Smit; Singels, 2006). Plantas com maior tolerância à deficiência hídrica produzem folhas novas com maior densidade estomática, porém, com estômatos menores, o que aumenta a resistência à movimentação do ar da camada imediatamente adjacente à epiderme foliar e evita danos às trocas gasosas, ou seja, há diminuição da perda de água sem impedir que a absorção de gás carbônico siga ocorrendo (Larcher, 2004).

Os acessos IJ 76-358, IJ 76-381 (*E. arundinaceus*), Fiji\_15 (*Miscanthus* sp.) e IJ 76-414 (*S. robustum*) apresentaram reduções significativas no acúmulo de biomassa seca de raízes (BSR) em função da supressão hídrica. Estes acessos, juntamente com a US 721319 (*S. spontaneum*), foram os que apresentaram os maiores valores para a BSR, tanto nas condições ideais de hidratação do solo (testemunha) quando no tratamento de supressão hídrica de 16 dias durante o período formativo do desenvolvimento. As maiores diferenças nas produções de biomassa seca de raízes foram constatadas nos acessos Fiji\_15 (55 %), Fiji\_10 (54 %), IJ 76-358 (36 %) e IJ 79-414 (36 %) (Figura 10).



**Figura 10.** Biomassa seca de raízes de acessos do complexo *Saccharum* sob diferentes condições de umidade do solo aos 106 dias após o plantio. Rio Largo, AL, 2021.

\*Letras maiúsculas distintas entre variedades dentro de cada tratamento ou minúsculas distintas entre tratamentos dentro da mesma variedade diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

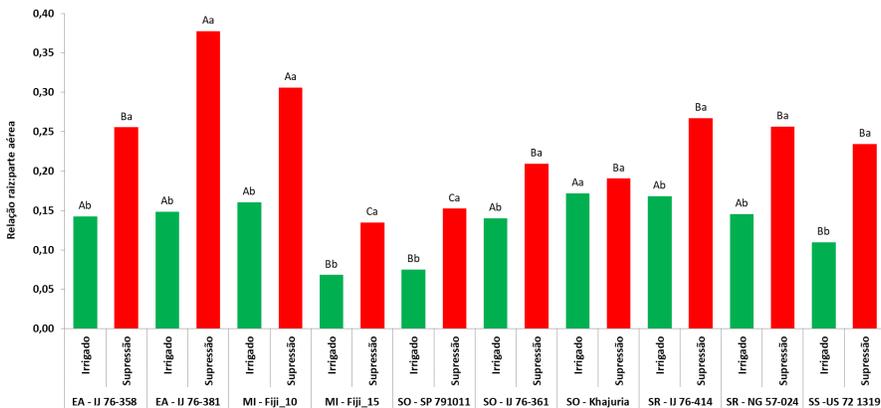
O desenvolvimento das raízes das plantas é influenciado pelo déficit hídrico, entretanto, relativamente menos do que a biomassa da parte aérea (Smit; Singels, 2006). Para se adaptarem às condições de déficit hídrico, algumas plantas adotam a estratégia de redução da parte aérea em favor das raízes, limitando sua capacidade de competir por luz, pela diminuição da área foliar, com consequente redução na produtividade (Nabinger, 1997), aceleração na taxa de senescência foliar, inibição do perfilhamento e ramificações e a aceleração da morte dos perfilhos estabelecidos, bem como atraso no seu crescimento e desenvolvimento (Buxton; Fales, 1994).

Em condições de estresse hídrico, as raízes atuam nos mecanismos de sinalização da deficiência hídrica do solo (Dodd, 2005), mediante envio de sinais bioquímicos aos estômatos através da corrente transpiratória (Grantz, 2014). O sistema radicular regula diversos processos que ocorrem na parte aérea mediante a produção e translocação de sinais bioquímicos (ácido abscísico, nitratos, citocininas, íons e fitormônios), modificando processos de expansão foliar, comportamento estomático e a biossíntese de enzimas da fotossíntese (Aiken; Smucker, 1996). As diversas combinações desses mecanismos contribuíram para as respostas diferenciadas observadas entre os acessos estudados no presente trabalho.

A elevada robustez da espécie *S. spontaneum* em ambientes restritivos é atribuída, em grande parte, à sua capacidade de desenvolvimento dos

órgãos subterrâneos (raízes e rizomas) (Matsuoka; Garcia, 2011). *S. spontaneum* apresenta elevada produção de fibras em detrimento de açúcares e presença de rizomas vigorosos, que auxiliam as plantas na captação de nutrientes e absorção de água em maiores profundidades, contribuindo com o processo metabólico de tolerância à deficiência hídrica (Rodrigues et al., 2018). Diferentemente da espécie *S. spontaneum*, as espécies *S. robustum* e *S. officinarum* não produzem rizomas (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011).

Todos os acessos avaliados apresentaram incrementos significativos na relação raiz:parte aérea (R:PA) em função da supressão hídrica, exceto o acesso Khajuria (*S. officinarum*). Os acessos IJ 76-381 (*E. arundinaceus*), Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.) foram as que apresentaram as maiores relações R:PA no tratamento supressão hídrica, enquanto os acessos US 721319 (*S. spontaneum*), Fiji\_15 (*Miscanthus* sp.) e SP 791011 (*S. officinarum*) foram as que apresentaram as menores relações R:PA sob condições ideais de umidade do solo do tratamento testemunha (Figura 11).



**Figura 11.** Relação raiz:parte aérea (R:PA) em acessos do complexo *Saccharum* sob diferentes condições hídricas aos 106 dias após o plantio. Rio Largo, AL, 2021.

\*Letras maiúsculas distintas entre variedades dentro de cada tratamento ou minúsculas distintas entre tratamentos dentro da mesma variedade diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

O aumento na relação entre o sistema radicular e a parte aérea observada na maioria dos acessos em função da restrição hídrica, decorre do direcionamento de maiores quantidades de solutos às raízes para ajustamento osmótico. A deficiência hídrica no solo afeta negativamente o crescimento da

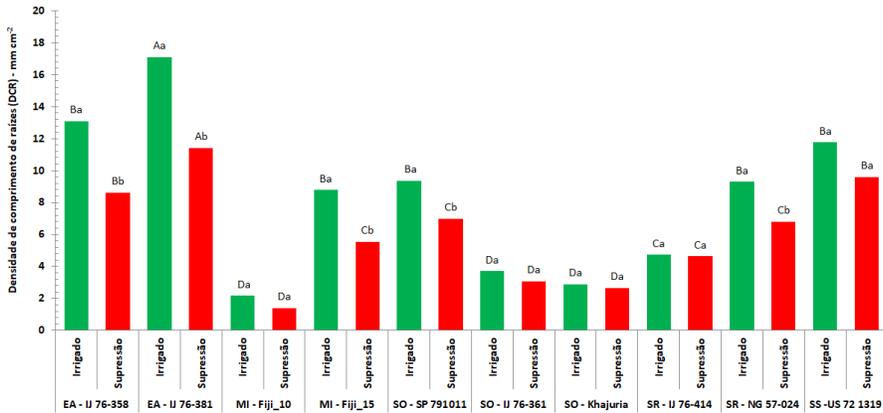
parte aérea, principalmente o número de folhas verdes, devido à progressão da senescência foliar e à inibição do surgimento de novas, o que ocasiona menor interceptação da radiação solar e consequente redução na eficiência de uso da água e na fotossíntese (Inman-Bamber, 2004). Durante o estresse hídrico as folhas emergentes tendem a ficar acumuladas na parte emergente (cartucho) da planta, devido ao baixo potencial de água na planta e no solo (Inman-Bamber; Smith, 2005).

Sob deficiência hídrica, o crescimento das raízes é menos inibido do que o da parte aérea. Tal resposta visa proteger a planta contra a desidratação excessiva através do controle do mecanismo de abertura e fechamento estomático que restringe a transpiração. Em condições de déficit hídrico no solo, a manutenção de grande massa de raízes pode resultar em gasto excessivo de energia metabólica e trazer consequências negativas sobre o crescimento das plantas e sobre a produtividade. Ao contrário, a manutenção de pequena massa radicular com formação de raízes novas, antes dos períodos críticos de umidade, pode contribuir para a manutenção da produtividade (Vasconcelos, 2002).

Quando o déficit hídrico do solo é prolongado, o crescimento radicular também é reduzido, sendo acompanhado pelo desenvolvimento da exoderme próxima ao ápice radicular, bem como pela morte das células epidérmicas, resultando em aumento no grau de suberização das raízes (Kramer; Boyer, 1995).

## Densidade de comprimento de raízes (DCR)

Os acessos IJ 76-358 e IJ 76-381 (*E. arundinaceus*), Fijj\_15 (*Miscanthus* sp.), SP 791011 (*S. officinarum*) e NG 57-024 (*S. robustum*) apresentaram reduções significativas nos valores de DCR em função da supressão hídrica. Nos dois tratamentos, os maiores valores de DCR foram constatados no acesso IJ 76-381. No tratamento testemunha, os acessos US 72 1319 (*S. spontaneum*), Fijj\_15, SP 791011, NG 57-024 (*S. robustum*) e IJ 76-358 apresentaram valores de DCR superiores às demais, com exceção do acesso IJ 76-381. No tratamento supressão hídrica, os acessos US 721319 e IJ 76-358 apresentaram maiores taxas de DCR em relação às demais, exceto o acesso IJ 76-381 (Figura 12).



**Figura 12.** Densidade de comprimento de raízes em acessos do complexo *Saccharum* sob diferentes condições hídricas dos 90 aos 106 dias após o plantio. Rio Largo, AL, 2021.

\*Letras maiúsculas distintas entre variedades dentro de cada tratamento ou minúsculas distintas entre tratamentos dentro da mesma variedade diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Zhao et al. (2020) verificaram que o acesso de cana-de-açúcar ROC 22 foi o que apresentou a maior densidade de comprimento de raízes ( $3,10 \text{ mm cm}^{-2}$ ) aos 275 dias após o corte (rebrotas), à profundidade de 0 a 36 cm do perfil de um solo argiloso, quando comparada a outros três acessos ( $1,67 - 2,65 \text{ mm cm}^{-2}$ ). Ohashi et al. (2015), utilizando o método do minirrizotron para avaliar o sistema radicular de três acessos de cana-de-açúcar, estimaram valores de DCR variando entre  $3,6$  e  $12,9 \text{ mm cm}^{-2}$  aos 205 dias após a rebrota, considerando a profundidade de 0 a 0,8 m do perfil de um Latossolo.

O acesso IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) apresentou os maiores valores de DCR tanto no tratamento testemunha (Figura 13) sob supressão hídrica (Figura 14).



Foto: Anderson C. Marafon

**Figura 13.** Sistema radicular do acesso IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) mantido irrigado dos 90 aos 106 dias após o plantio, tratamento testemunha. Rio Largo, AL, 2021.



Foto: Anderson C. Marafon

**Figura 14.** Sistema radicular do acesso IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) sujeito à supressão hídrica dos 90 aos 106 dias após o plantio, sob supressão hídrica. Rio Largo, AL, 2021.

A redução no crescimento das raízes do acesso IJ 76-381 em função da supressão de água dos 90 aos 106 DAP foi da ordem de 49,7%, cuja DCR passou de 17,1 mm cm<sup>-2</sup> no tratamento controle (irrigado) para 11,4 mm cm<sup>-2</sup> no tratamento de supressão hídrica. Em termos comparativos, no caso da variedade comercial de cana-de-açúcar SP 791011, a redução na DCR foi da ordem de 25,5%. Embora a redução do crescimento radicular tenha sido considerável, a redução na produção de BSPA foi muito afetada pela supressão

de água, refletindo-se na maior relação R:PA dentre todos os acessos (0,38) (Figura 9).

*E. arundinaceus* (Rez.) Jeswiet é uma espécie de folhas largas e que apresenta relativa tolerância à seca, com alto teor de fibras e alta produção de biomassa (Amalraj et al., 2008). A espécie tem recebido maior atenção por parte de melhoristas por causa de sua elevada estatura e do alto teor de matéria seca (cerca de 47%), chegando a produzir até 127 Mg ha<sup>-1</sup> em parcelas experimentais (Stricker et al. 1993). Augustine et al. (2015) verificaram que a superexpressão da proteína EaHSP70 obtida de um acesso de *E. arundinaceus* promoveu maior tolerância à seca no acesso de cana-de-açúcar Co 86032, sugerindo que a manipulação da cana-de-açúcar cultivada com este gene poderia aumentar sua adaptação em condições reais de cultivo sob déficit hídrico.

O desenvolvimento das raízes em soqueiras de cana-de-açúcar envolve a morte gradativa e a renovação das raízes do primeiro ciclo de cultivo (cana-planta), sendo acelerada por ciclos de secagem e retomada do umedecimento do solo após o corte da planta. Na fase de rebrota (cana-soca), as raízes que permanecem ativas sob deficiência hídrica, juntamente com os rizomas, constituem-se em reservas para o suprimento de nutrientes que garantem o perfilhamento inicial da soqueira o que, em geral, é lento em períodos de seca (Vasconcelos; Casagrande, 2008).

A densidade de comprimento de raízes é importante para determinar o potencial de absorção de água e nutrientes do sistema radicular das plantas (Caldwell; Virginia, 1991). Neste sentido, maiores densidades de comprimento de raízes refletem em melhores taxas de absorção de água, uma característica desejável, em especial quando a água é o principal fator limitante do crescimento da planta, tendo em vista o aumento da extração de umidade em maiores profundidades do solo (Blum, 2005; Tardieu, 2012). A instabilidade volumétrica de solos devido à mudança no teor de água é complexa e influenciada por vários fatores, entre os quais o tipo de solo, condicionantes climáticos e estados de tensão. A estrutura do solo influencia a distribuição das raízes em profundidade pois afeta o equilíbrio das tensões (água, ar e resistência do solo). Um solo 'bem estruturado' apresenta poros contínuos da superfície até as camadas mais profundas e possibilita a penetração das raízes e o acesso à água e ar (Whitmore; Whalley, 2009). Entretanto, Lynch

(2007) afirma que as culturas tendem a desenvolver raízes nas camadas mais superficiais do solo para aquisição de nutrientes (particularmente fósforo) e nas camadas mais profundas para extração de água.

## Conclusões

---

Os acessos com maiores capacidades de manutenção das taxas de trocas gasosas sob condições de deficiência hídrica do solo são Khajuria e IJ 76-361 (*S. officinarum*) para a transpiração, Khajuria, Fiji\_15 e Fiji\_10 (*Miscanthus* sp.) para a condutância estomática e SP 791011 e Khajuria (*S. officinarum*) para a fotossíntese.

As maiores reduções nas taxas de trocas gasosas (E, gs e A) são observadas nos acessos de *E. arundinaceus* (IJ 76-358 e IJ 76-381) e de *S. spontaneum* (US 711319).

Em condições de supressão hídrica os acessos Fiji\_15 (*Miscanthus* sp.), SP 791011 (*S. officinarum*), IJ 76-381 (*E. arundinaceus*), US 72 1319 (*S. spontaneum*) e IJ 76-358 (*E. arundinaceus*) apresentam as maiores produções de biomassa seca da parte aérea, enquanto os acessos IJ 76-358, IJ 76-381 (*E. arundinaceus*), Fiji\_15 (*Miscanthus* sp.), IJ 76-414 (*S. robustum*) e US 721319 (*S. spontaneum*) apresentam os maiores acúmulos de biomassa seca de raízes.

As densidades de comprimento de raízes dos acessos IJ 76-358, IJ 76-381 (*E. arundinaceus*), Fiji\_15 (*Miscanthus* sp.), NG 57-024 (*S. robustum*) e da variedade RB 791011 (*S. officinarum*) sofrem reduções em função da supressão hídrica.

O acesso IJ 76-381 apresenta a maior densidade de comprimento de raízes tanto sob condições ideais de umidade do solo quanto sob déficit hídrico.

Os acessos Khajuria (*S. officinarum*), IJ 76-381 (*E. arundinaceus*) e US 72 1319 (*S. spontaneum*) reúnem as melhores características de tolerância à seca, podendo ser incorporados em programas de melhoramento genético para o desenvolvimento de cultivares comerciais de cana-de-açúcar com maior tolerância a déficit hídrico.

## Referências

---

- AIKEN, R. M.; SMUCKER, A. J. M. Root system regulation of whole plant growth. **Annual Review of Phytopathology**, v. 34, p. 325-346, 1996.
- AMALRAJ, V. A.; RAKKIYAPPAN, P.; NEELAMATHI, D.; CHINNARAJ, S.; SUBRAMANIAN, S. Wild cane as a renewable source for fuel and fibre in the paper industry. **Current Science**, v. 95, n. 11, p. 1599-1602, 2008.
- AMALRAJ, V. A.; BALASUNDARAM, N. On the taxonomy of the members of *Saccharum* complex. **Genetic Resource and Crop Evolution**, v. 53, p. 35-41, 2005.
- AUGUSTINE, S. M.; NARAYAN, J. A.; SYAMALADEVI, D. P.; APPUNU, C.; CHAKRAVARTHI, M.; RAVICHANDRAN, V.; SUBRAMONIAN, N. *Erianthus arundinaceus* HSP70 (EaHSP70) overexpression increases drought and salinity tolerance in sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid). **Plant Science**, v. 232, p. 23-34, 2015.
- BERGONCI, J. I.; PEREIRA, P. G. Comportamento do potencial da água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 229-235, 2002.
- BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential - are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? **Crop Pasture Science**, v. 56, p. 1159-1168, 2005.
- BUCKSCH, A.; BURRIDGE, J.; YORK, L. M.; DAS, A.; NORD, E.; WEITZ, J. S.; LYNCH, J. P. Image-based high-throughput field phenotyping of crop roots. **Plant Physiology**, v. 166, p. 470-486, 2014.
- BUXTON, D. R.; FALES, S. L. Plant environment and quality In: FAHEY JUNIOR, G. C. (Ed.) **Forage quality, evaluation and utilization**. Lincoln: University of Nebraska, 1994. p. 155-199.
- CAI, Q.; AITKEN, K.S.; DENG, H. H.; CHEN, X. W.; FU, C. JACKSON, P. A.; MCINTYRE, C. L. Verification of the introgression of *Erianthus arundinaceus* into sugarcane using molecular markers Verification of the introgression of *Erianthus arundinaceus* into sugarcane using molecular markers. **Plant Breeding**, v. 124, p. 322-328, 2005.
- CALDWELL, M. M.; VIRGINIA, R. A. Root Systems. In: PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J.; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. **Plant Physiological Ecology**. London: Chapman & Hall, 1991. p. 367-398.
- CARVALHO, A. L.; MENEZES, R. S. C.; NÓBREGA, R. S.; SIQUEIRA PINTO, A.; OMETTO, J. P. H. B.; VON RANDOW, C.; GIAROLLA, A. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. **Renewable Energy**, v. 78, p. 26-34, 2015.
- CAVATTE, P. C.; MARTINS, S. C. V.; MORAIS, L. E.; SILVA, P. E. M.; SOUZA, L. T.; DA MATTA, F. M. A fisiologia dos estresses abióticos. In: FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. (ed.). **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Visconde do Rio Branco: Suprema. 2011. 250 p.
- CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; ABREU, H. M. C.; ARRUDA, P.; BESPALHOK FILHO, J. C.; BURNQUIST, W. L.; CRESTE, S.; DI CIERO, L.; FERRO, J. A.; FIGUEIRA, A. V. de O.; FILGUEIRAS, T. de S.; GROSSI de SÁ, M. de F.; GUZZU, E. C.; HOFFMANN, H. P.; LANDELL, M. G. de A.; MACEDO, N.; MATSUOKA, S.; REINACH, F. de C.; ROMANO, E.; SILVA, W. J. da; SILVA FILHO, M. de C.; ULIAN, E. C. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, v. 4, p. 62 - 89, 2011.

CLIFTON-BROWN, J. C.; LEWANDOWSKI, I.; BANGERTH, F.; JONES, M. B. Comparative responses to water stress in stay-green, rapid- and slow senescing genotypes of the biomass crop, *Miscanthus*. **New Phytology**, v. 154, p. 335-345, 2002.

DANIELS, J.; ROACH, B. T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, H. J. **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier, 1987. cap. 2, p. 7 - 48.

DODD, I. C. Root-to-shoot signaling. **Plant Soil**, v. 274, p. 251-270, 2005.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a Computer Statistical Analysis System. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, T. H. S.; TSUNADA, M. S.; BASSI, D.; ARAÚJO, P.; MATTIELLO, L.; GUIDELLI, G. V.; RIGHETTO, G. L.; GONÇALVES, V. R.; LAKSHMANAN, P.; MENOSSI, M. Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1-18, 2017.

GRANTZ, D. A. Water, Transpiration, and Gas Exchange. In: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. **Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology**. Iowa: John Wiley & Sons, 2014. p. 221-254.

HERRY, R. J.; KOLE, C. **Genetics, genomics and breeding of sugarcane**. Enfield: Science Publishers, 2010. 264 p.

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

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v. 89, p. 107-122, 2004.

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

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

KAR, S.; WENG, T.; NAKASHIMA, T. Field performance of *Saccharum* × *Miscanthus* intergeneric hybrids (Miscanes) under cool climatic conditions of Northern Japan. **BioEnergy Research**, v. 13, p. 132-146, 2019.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic, 1995. 495 p.

KRAUSE, G. H. Photoinhibition of photosynthesis: an evaluation of damaging and protective mechanisms. **Physiologia Plantarum**, v. 74, p. 566-574, 1988.

LAKSHMANAN, P.; ROBINSON, N. Stress Physiology: Abiotic Stresses. In: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. **Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology**. Iowa: John Wiley & Sons, 2014. p. 411-434.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2004. 531 p.

LYNCH, J. P. Roots of the Second Green Revolution. **Australian Journal of Botany**, v. 55, n. 5, p. 493-512, 2007.

LOPES, N. F.; LIMA, M. G. S. **Fisiologia da Produção**. Viçosa: Editora UFV, 2015. 492 p.

MACHADO, R.; RIBEIRO, R.; MARCHIORI, P.; MACHADO, D.; MACHADO, E.; LANDELL, M. Biometric and physiological responses to water deficit in sugarcane at different phenological stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, dez. 2009.

- MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F. Sugarcane Underground Organs: Going Deep for Sustainable Production. **Tropical Plant Biology**, v. 4, n. 1, p. 22–30, mar. 2011.
- MING, R.; MOORE, P. H.; WU, K. K.; GLASSMANN, G. C.; D'HONT, A.; TEW, T. L. Sugarcane improvement through breeding and biotechnology. **Plant Breeding Review**, v. 27, p. 15-118, 2006.
- NABINGER, C. Princípios da exploração intensiva de pastagens. In: Simpósio sobre manejo de pastagens, 13., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1997. p. 15-95.
- NABLE, R. O.; ROBERTSON, M. J.; BERTHELSEN, S. Response of shoot growth and transpiration to soil drying in sugarcane. **Plant and Soil**, v. 207, p. 59-65, 1999.
- OHASHI, A. Y. P.; PIRES, R. C. D. M.; RIBEIRO R. V.; SILVA, A. L. B. Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertigated by a subsurface drip system. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p.131-138, 2015.
- RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy & Crop Science**, v. 185, n. 2, p. 83-89, set. 2000.
- REWALD, B.; EPHRATH, J. E. Modern Research Techniques: minirhizotron techniques. In: ESHEL, A.; BEECKMAN, T. **Plant roots: the hidden half**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 42-58.
- RODRIGUES, J. D.; JADOSKI, C. J.; FAGAN, E. B.; ONO, E. O.; SOARES, L. H.; NETO, D. D. **Fisiologia da produção de cana-de-açúcar**. São Paulo: Andrei Editora, 2018. 177 p.
- SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crop Research**, v. 98, n. 2-3, p. 91-97, aug./sep. 2006.
- SMITH, D. H.; INMAN-BAMBER, N. G. THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 169-183, jun. 2005.
- STRICKER, J. A.; PRINE, G. M.; ANDERSON, D. L.; SHIBLES, D. B.; RIDDLE, T. C. **Production and management of biomass/energy crops on phosphatic clay in central Florida**. Florida: University of Florida, 1993. 8 p. (Florida Cooperative Extension Service. Circular 1084).
- SURENDRA, K. C.; OGOSHI, R.; ZALESKI, H. M.; HASHIMOTO, A. G.; KHANAL, S. K. High yielding tropical energy crops for bioenergy production: Effects of plant components, harvest years and locations on biomass composition. **Bioresource Technology**, v. 251, p. 218–229, mar. 2018.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.
- TARDIEU, F. Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right drought scenario. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 1, p. 25-31, jan. 2012.
- TEW, T. L.; COBILL, R. M. Genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.) as an energy crop. In: VERMERRIS, W. **Genetic improvement of bioenergy crops**. New York Springer: p. 249–272.
- VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A. Fisiologia do sistema radicular. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 79-97.

VASCONCELOS, A. C. M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita**: crua mecanizada e queimada manual. 2002. 140 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

WILKINSON, S.; DAVIES, W. J. Xylem sap pH increase: a drought signal received at the apoplastic face of the guard cell that involves the suppression of saturable abscisic acid uptake by the epidermal symplast. **Plant Physiology**, v. 113, 559-573, 1997.

WHITMORE, A. P.; WHALLEY, W. R. Physical effects of soil drying on roots and crop growth. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 10, p. 2845-2857, 2009.

WU, W.; CHENG, S. Root genetic research, an opportunity and challenge to rice improvement. **Field Crops Research**, v. 165, p. 111-124, ago. 2014.

YORDANOV, I. VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant responses to drought and stress tolerance. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, v. 1, p. 187-206, 2003.

ZHAO, L.; YANG, K.; ZHAO, P.; QIN, W.; ZHAO, Y.; ZHU, J.; ZAN, F.; ZHAO, J.; LU, X.; WU, C.; BURNER, D. M.; CHEN, X.; LIU, J. Sugarcane root distribution and growth as affected by genotype and crop cycle. **Bragantia**, v. 79, n. 2, p. 192-202, 2020.



---

*Tabuleiros Costeiros*

