

SIRLEIDE MARIA DE MENEZES

**CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO**

RECIFE - PE
SETEMBRO DE 2022

SIRLEIDE MARIA DE MENEZES

**CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

Orientador: Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Manassés Mesquita da Silva

RECIFE - PE
SETEMBRO DE 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M543c Menezes, Sirleide Maria de
Cultivo de cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação por gotejamento pulsado e contínuo / Sirleide Maria de Menezes. -
2022.
148 f. : il.

Orientador: Geronimo Ferreira da Silva.
Inclui referências.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
Recife, 2023.

1. Manejo de irrigação. 2. Irrigação por pulsos. 3. Déficit hídrico. 4. Fertirrigação. 5. Saccharum spp. I. Silva, Geronimo
Ferreira da, orient. II. Título

CDD 630

SIRLEIDE MARIA DE MENEZES

Engenheira Agrônoma

**CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

DEFENDIDA e APROVADA em 23 de setembro de 2022

Banca Examinadora

Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva - DEAGRI/UFRPE
Presidente/Orientador

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva - DEAGRI/UFRPE
Membro Interno

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto - EECAC/UFRPE
Membro Externo

Prof. Dr. José Vieira Silva - UFAL/ARAPIRACA
Membro Externo

Prof. Dr. Márcio Aurélio Lins dos Santos - UFAL/ARAPIRACA
Membro Externo

Aos meus queridos e amados pais, Aurélio Menezes e Jacira Menezes,
Que na simplicidade e humildade da vida que levam
Sempre me deram o que eu mais precisava
Amor, apoio e um “não” (quando necessário),
Por vocês tenho um amor incondicional.

Aos meus irmãos,
Que sempre me apoiaram,
Que nutriram junto comigo a realização desse objetivo.
Pelo amor, carinho e compreensão que recebo de cada um deles.

Ao meu companheiro Gebson Pinheiro,
Por ser a melhor companhia em todas as ocasiões,
Pelo empenho e dedicação à minha felicidade.

Aos amigos,
Pela motivação e apoio nessa jornada,
Por fazerem os dias difíceis se tornarem mais leves,
Pela partilha de momentos incríveis e por todo aprendizado adquirido.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus** por me permitir a vida, me conceder saúde, coragem e determinação na busca pela realização dos meus objetivos, pelo amor incondicional e por se fazer verdadeiramente presente em todos os momentos.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco - Departamento de Engenharia Agrícola.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA) pela oportunidade de crescimento profissional. A todos que fazem parte dessa equipe: coordenadores, professores e técnicos, muito obrigada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão da Bolsa de estudo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro para a execução da pesquisa.

À Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC), por disponibilizar o espaço para a realização do experimento, bem como todo suporte técnico e estrutural durante a condução do trabalho. Em especial ao diretor Dr. Djalma Euzébio Simões Neto pelo apoio, orientação e ajuda no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) pela parceria na realização das análises.

Ao professor Dr. Gerônimo Ferreira da Silva, pela orientação, apoio, confiança e amizade prestada. Muito obrigada pelos ensinamentos profissionais e pessoais. Foi um grande prazer poder trabalhar com o senhor.

Ao Professor Dr. Manassés Mesquita da Silva, pela coorientação do trabalho, pelos ensinamentos e por toda ajuda e apoio que recebi.

À equipe de trabalho, pela dedicação, esforço, compreensão e amizade: Wellisson Andrade, Catiana Vasconcelos, Carolyne Souza, Vitória Costa, Anna Cecília, Fabiano Simplício e Madson Rafael.

Aos funcionários da EECAC, em especial: Evanilson, Jeferson, Jean, Carpina, Fábio, João, Mariluce e Dona Suzana. Também aos funcionários terceirizados de campo. Sou muito grata a todos.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a efetivação da pesquisa, desde as atividades de campo até às análises de dados e escrita. Em especial, ao amigo José Edson Morais, pela forte amizade e por toda ajuda, sou imensamente grata por todo apoio, paciência, incentivo e colaboração.

Aos colegas do curso por quem tenho apreço inestimável, e com quem guardo as melhores lembranças, que fizeram dos dias difíceis os mais engraçados e memoráveis possível.

E aos amigos que Recife me presenteou, aqueles que levarei com carinho no lado esquerdo do peito.

Sou imensamente grata!

⁶*Sejam fortes e corajosos. Não tenham medo,
Nem fiquem apavorados por causa deles,
Pois o Senhor, o seu Deus, vai com vocês;
Nunca os deixará, nunca os abandonará.*

⁷*Então Moisés convocou Josué e lhe disse
Na presença de todo o Israel: "Seja forte e corajoso",
Pois você irá com este povo para a terra que
O Senhor jurou aos seus antepassados que lhes daria,
E você a repartirá entre eles como herança.*

⁸*O próprio Senhor irá à sua frente e estará com você;
Ele nunca o deixará, nunca o abandonará.
Não tenha medo! Não se desanime!*

"Deuteronômio 31:6-8"

*Não existem sonhos impossíveis
Para aqueles que realmente acreditam que
O poder realizador reside no interior de
Cada ser humano, sempre que alguém
Descobre esse poder, algo antes
Considerado impossível se torna realidade.*

"Albert Einstein"

Menezes, Sirleide Maria de. **Cultivo de cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação por gotejamento pulsado e contínuo**. 2022. 148f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande expressividade no mercado agrícola mundial devido a sua contribuição para a indústria alimentícia e sucroenergética. Com a expansão do setor sucroalcooleiro e os períodos de instabilidade climática, surge a necessidade de novas tecnologias e ferramentas, como a irrigação, que garante a seguridade da produção com ganhos em quantidade e qualidade nos canaviais. Nesse sentido, a técnica da irrigação por pulsos visa dar suporte ao manejo de irrigação apresentando potencial para maximizar o uso de água e de nutrientes, e dessa forma contribuir com a racionalização dos insumos e a sustentabilidade dos sistemas de cultivos. Desse modo, objetivou-se avaliar os aspectos nutricionais, fisiológicos, de crescimento e produtivos da cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação por gotejamento pulsado e contínuo. Para isso, conduziu-se um experimento em condições de campo na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE) localizada na cidade de Carpina - PE. O delineamento experimental foi do tipo blocos ao acaso com 10 tratamentos distribuídos em esquema fatorial 2 x 5, sendo o primeiro fator o tipo de aplicação da irrigação (irrigação por pulsos e irrigação contínua) e o segundo fator cinco lâminas de reposição da evapotranspiração da cultura (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc), com quatro repetições. Para a condição de aplicação da irrigação por pulsos foram definidos quatro pulsos de irrigação com intervalo de 40 minutos de repouso entre duas irrigações. O aumento do déficit hídrico reduziu a extração e a exportação de nutrientes, as trocas gasosas, o crescimento e o rendimento produtivo da cana-de-açúcar. A irrigação pulsada mitigou os efeitos negativos do déficit hídrico e proporcionou incremento nos aspectos nutricionais, fisiológicos, de crescimento e produtivo da cultura.

Palavras-chave: Manejo de irrigação; Irrigação por pulsos; Déficit hídrico; Fertirrigação; *Saccharum spp.*

Menezes, Sirleide Maria de. **Sugarcane cultivation under pulsed and continuous drip irrigation**. 2022. 148f. Thesis (Ph.D in Agricultural Engineering) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

ABSTRACT

Sugarcane is a highly expressive crop in the world agricultural market due to its contribution to the food and sugar-energy industry. With the expansion of the sugar-alcohol sector and periods of climatic instability, the need for new technologies and tools, such as irrigation, arises, which guarantees the security of production with gains in quantity and quality in the sugarcane fields. In this sense, the pulse irrigation technique aims to support irrigation management with the potential to maximize the use of water and nutrients, and thus contribute to the rationalization of inputs and the sustainability of cropping systems. For this, an experiment was conducted under field conditions at the Experimental Sugar Cane Station of Carpina (EECAC/UFRPE) located in the city of Carpina – PE. The experimental design was a randomized block design with 10 treatments distributed in a 2 x 5 factorial scheme, the first factor being the type of irrigation application (pulse irrigation and continuous irrigation) and the second factor five replacement depths of crop evapotranspiration. (40, 60, 80, 100, and 120% of ET_c), with four repetitions. For the pulse irrigation application condition, four irrigation pulses were defined with a 40-minute rest interval between two irrigations. The increase in water deficit reduced the extraction and export of nutrients, gas exchange, growth, and productive yield of sugarcane. Pulsed irrigation mitigated the negative effects of water deficit, and provided an increase in the nutritional, physiological, growth, and productive aspects of the crop.

Palavras-chave: Irrigation management; Pulse irrigation; Water deficit; Fertirrigation; *Saccharum* spp.

SUMÁRIO

| | |
|--|--------------------------------------|
| RESUMO | IX |
| ABSTRACT | X |
| CAPÍTULO I..... | 15 |
| 1. INTRODUÇÃO GERAL | 16 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 18 |
| 2.1. A cultura da cana-de-açúcar..... | 18 |
| 2.1.1. Origem, aspectos botânicos e morfológicos..... | 18 |
| 2.1.2. Aspectos agronômicos e fenológicos..... | 19 |
| 2.1.3. Importância socioeconômica..... | 21 |
| 2.2. Irrigação na cana-de-açúcar | 23 |
| 2.2.1. Gotejamento subsuperficial..... | 24 |
| 2.3. Irrigação por pulsos | 27 |
| 2.4. Estresse hídrico | 29 |
| 2.5. Crescimento e componentes de produção da cana-de-açúcar sob estresse hídrico..... | 31 |
| 2.6. Nutrição mineral da cana-de-açúcar | 33 |
| 2.7. Aspectos fisiológicos..... | 35 |
| REFERÊNCIAS | Erro! Indicador não definido. |
| CAPÍTULO II..... | 52 |
| BIOMASSA VEGETAL, EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES EM CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO..... | 53 |
| 1. INTRODUÇÃO | 54 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 55 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 62 |
| 4. CONCLUSÕES | 76 |
| 5. REFERÊNCIAS..... | 77 |
| CAPÍTULO III | 83 |
| DESEMPENHO FISIOLÓGICO E PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO PULSADA E CONTÍNUA | 84 |
| 1. INTRODUÇÃO | 85 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 87 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 93 |
| 4. CONCLUSÕES | 105 |
| 5. REFERÊNCIAS..... | 106 |
| CAPÍTULO IV | 113 |
| CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO | 114 |
| 1. INTRODUÇÃO | 115 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 117 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 124 |
| 4. CONCLUSÕES..... | 136 |
| 5. REFERÊNCIAS..... | 137 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 146 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|------------|
| Capítulo I | 14 |
| Figura 1. Estádios fenológicos da cana-de-açúcar | 19 |
| Capítulo II | 52 |
| Figura 1. Ilustração do croqui da área experimental | 57 |
| Figura 2. Valores de precipitação, evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração da cultura (ET _c), e lâmina bruta aplicada nos tratamentos de 40% (LB 40%), 60% (LB 60%) 80% (LB 80%), 100% (LB 100%) e 120% (LB 120%) da ET _c na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2022 | 60 |
| Figura 3. Produção de biomassa seca da parte aérea - BSPA (A) e biomassa seca dos colmos- BSC (B) em cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (ET _c) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua) | 63 |
| Figura 4. Extração e exportação de nitrogênio (A e B), fósforo (C e D) e potássio (E e F), respectivamente, na cultura da cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (ET _c) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua) | 65 |
| Figura 5. Extração e exportação de cálcio (A e B), magnésio (C e D) e enxofre (E e F), respectivamente, na cultura da cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (% ET _c) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua) | 70 |
| Figura 6. Extração e exportação de ferro (A e B) e manganês (C e D), respectivamente, na cultura da cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (ET _c) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua) | 73 |
| Figura 7. Extração e exportação de zinco (A e B) e cobre (C e D), respectivamente, na cultura da cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (ET _c) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua) | 74 |
| Capítulo III | 83 |
| Figura 1. Valores de precipitação, evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração da cultura (ET _c), e lâmina bruta aplicada nos tratamentos de 40% (LB 40%), 60% (LB 60%) 80% (LB 80%), 100% (LB 100%) e 120% (LB 120%) da ET _c na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2022 | 91 |
| Figura 2. Análise de componentes principais (PCA) para as trocas gasosas da cana-de-açúcar aos 180 DAC sob efeito dos tipos de aplicação (A) e das lâminas de irrigação (B), com os respectivos scores plot (C) e loading plot (D) | 104 |
| Figura 3. Análise de componente principal (PCA) para as trocas gasosas da cana-de-açúcar aos 315 DAC sob efeito dos tipos de aplicação (A) e das lâminas de irrigação (B), com os respectivos scores plot (C) e loading plot (D) | 105 |
| Capítulo IV | 115 |
| Figura 1. Valores de precipitação, evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração da cultura (ET _c), e lâmina bruta aplicada nos tratamentos de 40% (LB 40%), 60% (LB 60%) 80% (LB 80%), 100% (LB 100%) e 120% (LB 120%) da ET _c na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2022 | 123 |

- Figura 2.** Superfície de resposta para o número de perfilhos (NP) da cana-de-açúcar sob efeito de lâminas de irrigação (ETc) e dias após o corte (DAC), para o tipo de aplicação da irrigação pulsada (A) e contínua (B) 127
- Figura 3.** Superfície de resposta para a altura do colmo (AC) da cana-de-açúcar sob efeito de lâminas de irrigação (ETc) e dias após o corte (DAC), para o tipo de aplicação da irrigação pulsada (A) e contínua (B) 129
- Figura 4.** Superfície de resposta para o diâmetro do colmo (DC) da cana-de-açúcar sob efeito de lâminas de irrigação (ETc) e dias após o corte (DAC), para o tipo de aplicação da irrigação pulsada (A) e contínua (B) 130
- Figura 5.** Superfície de resposta para a área foliar (AF) da cana-de-açúcar sob efeito de lâminas de irrigação (ETc) e dias após o corte (DAC), para o tipo de aplicação da irrigação pulsada (A) e contínua (B) 132
- Figura 6.** Superfície de resposta para o índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar sob efeito de lâminas de irrigação (ETc) e dias após o corte (DAC), para o tipo de aplicação da irrigação pulsada (A) e contínua (B) 134
- Figura 7.** Produtividade de colmos (TCH) (A), rendimento bruto de açúcar (RBA) (B) e rendimento bruto de etanol (RBE) (C) na cultura da cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (ETc) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua) 136

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Capítulo II | 52 |
| Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental, e caracterização química da água utilizada para irrigação, Carpina 2022 | 56 |
| Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura | 59 |
| Tabela 3. Resumo da análise de variância para a extração e exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), e para a produção de biomassa seca da parte aérea (BSPA) e dos colmos (BSC) em cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua | 62 |
| Capítulo III | 83 |
| Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental, e caracterização química da água utilizada para irrigação, Carpina 2022 | 87 |
| Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura | 90 |
| Tabela 3. Fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO ₂ (Ci) e temperatura foliar (Tf) aos 180 e 315 DAC, em cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua | 94 |
| Tabela 4. Eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência intrínseca do uso da água (A/g _s), eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci), área foliar (AF), biomassa fresca da parte aérea (BFPA) e biomassa fresca dos colmos (BFC) aos 180 e 315 DAC, em cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua | 99 |
| Capítulo III | 83 |
| Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental, e caracterização química da água utilizada para irrigação, Carpina 2022 | 119 |
| Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura | 122 |
| Tabela 3. Resumo da análise de variância para a produtividade de colmos (TCH), rendimento bruto de açúcar (RBA) e rendimento bruto de etanol (RBE), em cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua | 135 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. INTRODUÇÃO GERAL

A cultura da cana-de-açúcar possui destaque no cenário agrícola mundial devido a sua versatilidade na geração de produtos e subprodutos altamente comercializáveis, fato que lhe confere grande impacto socioeconômico ao redor do mundo. A cultura possui grande importância na produção de alimentos, sendo responsável por cerca de 86% da produção mundial de açúcar, além disso, é usada como fonte de energia renovável através da produção de etanol e, mais recentemente, de bioeletricidade (OCDE-FAO, 2019; Garcia et al., 2020; Verma et al., 2021; Aquino e Fermino, 2022).

A cana-de-açúcar é cultivada em mais de 120 países, sendo o Brasil, atualmente, o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e açúcar, com 585,2 e 35,2 milhões de toneladas produzidas, respectivamente, em uma área cultivada de 8.317 milhões hectares (Aquino e Fermino, 2022; CONAB, 2022). O Brasil destaca-se também na produção de etanol, sendo o segundo maior produtor mundial, com 26,8 bilhões de litros produzidos na safra 2021/2022 (CONAB, 2022). Segundo dados da FAO (2020) e da CONAB (2022), a área cultivada com cana-de-açúcar é quase o dobro do que era a 21 anos atrás (4,804 mil hectares em 2000), entretanto, o aumento da produtividade foi de apenas 3,8% (de 67,8 em 2000 para 70,4 Mg ha⁻¹ em 2021).

Como qualquer outra cultura, a cana-de-açúcar é altamente dependente das condições climáticas locais, que influenciam diretamente no crescimento e desenvolvimento da cultura. Na safra 2021/2022 houve uma redução de 7,4% na produtividade nacional da cana-de-açúcar em relação à safra anterior, devido à ocorrência de anomalias climáticas, principalmente longos períodos de estiagem (CONAB, 2022). Embora a cultura seja reconhecida como moderadamente sensível ao déficit hídrico, esse estresse pode causar danos severos nos processos metabólicos da mesma, desencadeando uma série de efeitos fisiológicos que afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas ocasionando em perdas na qualidade e na produtividade dos canaviais (Cardozo et al., 2018; Verma et al., 2020; Dlamini, 2021).

A expansão do mercado de açúcar e etanol leva o setor sucroalcooleiro a projetar a necessidade de aumento da produção de cana-de-açúcar, devido à competitividade do mercado, sendo necessários alguns investimentos. Desse modo, os avanços tecnológicos podem contribuir consideravelmente para o crescimento do agronegócio nacional (Costa et al., 2019). Nesse contexto, o uso da irrigação surge como uma das alternativas mais viáveis para o aumento

na produtividade agrícola, bem como para promover melhorias na qualidade da matéria prima e reduzir os riscos de produção relacionados com insuficiência hídrica.

No cenário atual, em que a instabilidade climática representa uma ameaça constante para o aumento da produtividade e estabilidade dos sistemas de cultivos, devido principalmente às irregularidades pluviométricas e a escassez dos recursos hídricos, a água utilizada para fins de irrigação deve ser cuidadosamente gerenciada, para minimizar o desperdício e reduzir os custos de produção, a fim de manter a sustentabilidade econômica do sistema (Dingre e Gorantiwar, 2021; Zhou et al., 2021; Melo et al., 2022).

A implementação de novas tecnologias e o aprimoramento de técnicas nos sistemas de cultivos irrigados são necessárias para garantir o desenvolvimento de uma agricultura intensiva e sustentável que vise o aumento da produtividade e a qualidade dos produtos associado à redução no uso de insumos (Dingre e Gorantiwar, 2021). A esse respeito, tem-se a irrigação por pulsos, uma técnica empregada dentro do manejo de irrigação, que proporciona melhor aproveitamento da água aplicada, reduzindo as perdas de água e o gasto com energia (Zamora et al., 2021).

A irrigação por pulsos consiste na aplicação da lâmina diária requerida de forma fracionada, em que os períodos de aplicação são denominados pulsos, onde haverá períodos que os pulsos serão aplicados intercalados por períodos sem aplicação, até a que a lâmina diária requerida seja totalmente aplicada, promovendo menores perdas por percolação, maior uniformidade e eficiência de aplicação (Almeida et al., 2018; Rank e Vishnu, 2021).

Considerando a importância da produção de cana-de-açúcar, os benefícios da irrigação para esta cultura e a relevância no uso racional dos recursos hídricos, é indispensável estudar como a quantidade e a qualidade da cana-de-açúcar produzida é influenciada pela irrigação por pulsos em condições de estresse hídrico. Diante do exposto, o objetivo do estudo foi avaliar os aspectos nutricionais, fisiológicos, de crescimento e produtivo da cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de irrigação pulsada e contínua.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. A cultura da cana-de-açúcar

2.1.1. Origem, aspectos botânicos e morfológicos

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) tem sua origem proveniente da região sudeste do continente asiático, onde os relatos mais precisos citam a região central da Nova Guiné e Indonésia como o possível centro de origem dessa cultura (Matsuoka et al., 2005). Seu cultivo iniciou há mais de 10.000 anos a.C., sendo utilizada como planta ornamental de jardins e moradias, quando por volta de 1.000 anos a.C. a cultura se expandiu juntamente com as migrações náuticas dos habitantes do Oceano Pacífico, disseminando-se em várias ilhas do sul do Pacífico, na Indochina, no Arquipélago da Malásia e em Bengala, datando do século IX, os primeiros relatos do processo de produção e fabricação de açúcar na Índia (Miranda, 2008; UNICA, 2020).

A espécie foi descrita taxonomicamente pela primeira vez por Linnaeus, em 1753 (livro “Species Plantarum”), como pertencente à família Poaceae (Gramineae), classe Liliopsida, subclasse Commiliniidae, ordem Cyperales e gênero *Saccharum* (Hitchcock, 1923). É uma planta alógama semiperene, pertencente à classe das Monocotiledôneas, cujas variedades atuais cultivadas para produção de açúcar são híbridos interespecíficos complexos (*Saccharum* sp.) entre as espécies *S. officinarum* e *S. spontaneum* com contribuições de *S. robustum*, *S. barberi*, *S. sinense* e gêneros de gramíneas relacionados, como *Miscanthus*, *Erianthus* e *Narenga* (Daniels e Roach, 1987; Gupta et al., 2010; Altpeter e Oraby, 2010).

O desenvolvimento da cana-de-açúcar se dá com o surgimento de perfilhos em forma de touceira. A estrutura da touceira pode ser composta por colmos eretos, semi-erectos e decumbentes, características que são determinadas por aspectos genéticos (Scarpari e Beauclair, 2008). A intensidade do perfilhamento é importante para a produtividade do cultivo, que surgem mais rápido a partir do segundo ciclo de cultivo, devido ao sistema radicular já existente ter a função de nutrir os perfilhos até o surgimento de suas próprias raízes. Além disso, podem ser influenciados por fatores ambientais como temperatura, luz e condição hídrica do solo, bem como por fatores endógenos como o estágio fenológico e as características de cada cultivar (Almeida et al., 2008).

A cana-de-açúcar apresenta reprodução do tipo sexuada, no entanto, para o cultivo comercial utiliza-se a multiplicação assexuada por meio da propagação vegetativa devido, principalmente, a não garantia da variabilidade genética e, conseqüentemente, a manutenção

das características de interesse do produtor, a exemplo do plantio de cana-de-açúcar com alta produtividade, e também devido os custos de implantação ser menores. A inflorescência é do tipo panícula apresentando flores hermafroditas. As folhas são do tipo lanceolada e são compostas por: lâmina foliar, bainha e colar, aparecem dispostas em duas fileiras de forma oposta e alternadas, presas nas regiões nodulares dos colmos com lâminas de sílica em suas bordas, e bainha aberta. A sua disposição na planta pode variar de uma cultivar para outra, em ereta e rígida, ou flácida e arqueada, com ou sem pilosidade (Mozambani et al., 2006; Jadoski et al., 2011).

O caule possui crescimento cilíndrico do tipo colmo, normalmente de porte ereto composto de nós e entrenós distintos. É o material de maior interesse econômico, pois é nele que a planta acumula a sacarose, a matéria-prima essencial da cultura. O nó ou região nodal é a parte da cana onde se inserem as folhas e onde estão localizadas as gemas, formando o anel de crescimento (Mozambani et al., 2006).

As raízes são do tipo fasciculadas e apresentam rizomas que possuem nódios, internódios e gemas, responsáveis pelo aparecimento dos perfilhos, formados nas touceiras. Segundo Sampaio et al. (1995), as raízes podem atingir até 4 m de profundidade, embora cerca de 80% do sistema radicular se concentrem nos 20 cm superficiais do solo.

2.1.2. Aspectos agronômicos e fenológicos

O sistema de produção da cultura da cana-de-açúcar tem início com a chamada cana planta, tendo um período de crescimento que geralmente varia de 12 (cana precoce) a 18 (cana tardia) meses. Após a primeira colheita, a cultura rebrota dando início ao ciclo da chamada cana soca (ou soqueira). As canas-soca podem ser colhidas várias vezes, entretanto, considerando a viabilidade comercial e econômica do canavial, o mais comum para as condições de cultivo operacionais brasileiras é de quatro a cinco socas em sistema de cultivo em sequeiro, podendo dobrar esse número em condições de cultivo irrigado. Após a decisão de reforma do canavial, usualmente baseado no nível de produtividade da área o plantio é renovado, caracterizando um sistema de monocultura muito comum nos sistemas de produção do Brasil (Ferraro et al., 2009; Dias, 2016).

Em um cultivo de 12 meses, o estágio de maturação pode durar por volta de três meses (dos 270 aos 360 dias após o plantio). A síntese e o acúmulo rápido de açúcar acontecem durante essa fase, e há uma redução no crescimento vegetativo. Conforme a maturação progride,

açúcares simples (monossacarídeo, frutose e glicose) são transformados na própria cana-de-açúcar (sacarose, um dissacarídeo). A maturação da cana-de-açúcar decorre de baixo para cima, em que o maior acúmulo de açúcar é na parte de baixo. Condições ideais como alta incidência de luz solar, baixa nebulosidade, períodos noturnos com temperaturas amenas e dias quentes (ex: variação diurna maior em temperatura) e clima seco são altamente indutores da maturação (Lisson et al, 2005).

No que diz respeito à fenologia da cultura, basicamente o ciclo da cana-de-açúcar pode ser dividido em quatro estádios fenológicos bem definidos: brotação e estabelecimento, perfilhamento, crescimento da parte aérea e maturação dos colmos, (Figura 1).

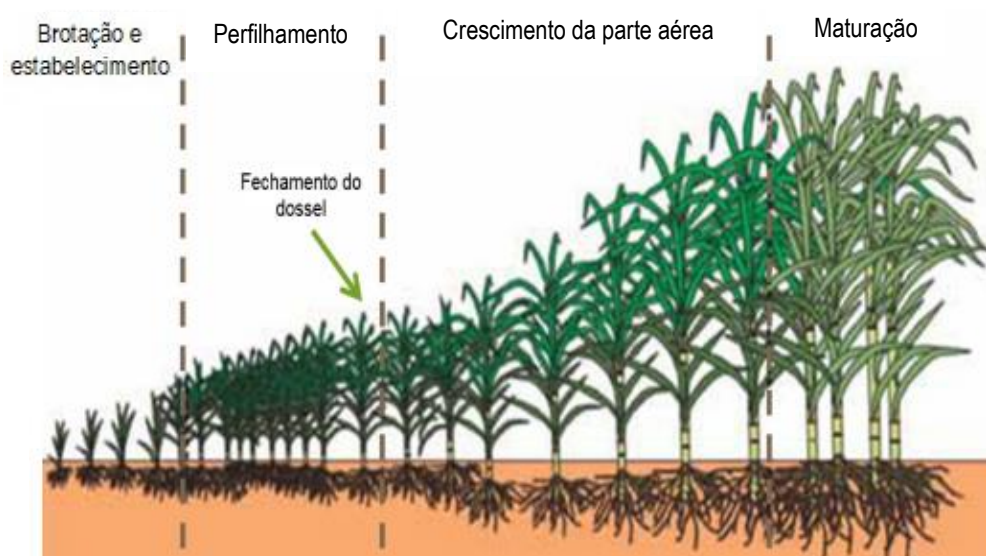


Figura 1. Estádios fenológicos da cana-de-açúcar

Fonte: Adaptado de YARABRASIL, 2019

A brotação e o estabelecimento das plantas ocorrem de maneira lenta levando de 20 a 30 dias; o período de perfilhamento inicia-se por volta dos 40 dias e pode durar até 120 dias; o crescimento da parte aérea ocorre ao atingir o perfilhamento máximo, geralmente a partir dos 120 dias após o plantio (ou corte) e pode durar até 270 dias, em um cultivo de 12 meses, sendo o estágio mais importante do cultivo, pois é quando se acumulam aproximadamente 75% da matéria seca total. Nesse período, a eficiência do processo de crescimento das plantas é determinada pela quantidade de radiação solar interceptada e sua conversão em matéria seca, sendo a eficiência de seu uso no processo de fotossíntese o principal motor da acumulação de biomassa (Sinclair et al., 2004; Heerden et al., 2010).

O estágio de maturação dos colmos ocorre quando há reduções nas taxas de crescimento da planta e aumento no acúmulo de sacarose nos colmos, tendo início de 270 a 360 dias após o plantio e podendo se prolongar por até seis meses (Diola e Santos, 2010; Batista et al., 2015). Em determinados períodos em que as condições ambientais estão desfavoráveis ao crescimento e desenvolvimento vegetativo, tais como temperaturas mais baixas e períodos de seca moderados, o acúmulo de sacarose no colmo da cana-de-açúcar tende a ser intensificado (Segato et al., 2006).

Uma das características que permitem a cana-de-açúcar produzir em diferentes ambientes deve-se ao fato de ser uma planta C₄, pois têm elevadas taxas fotossintéticas e alta eficiência na conversão de energia luminosa em energia química, sob condições tropicais. Dessa forma, a cultura é bastante efetiva para a produção de biomassa, sendo seu uso, principalmente, para a produção de açúcar e biocombustível (Barbosa et al., 2015a; Taiz et al., 2017).

2.1.3. Importância socioeconômica

A cultura da cana-de-açúcar é cultivada por pequenos, médios e grandes produtores e de forma direta e indireta gera grande oferta de empregos o que a torna uma cultura de grande importância socioeconômica e ambiental para o país. É amplamente cultivada ao redor do mundo e representa o principal produto agrícola usado como matéria prima para a agroindústria na fabricação de açúcar e álcool (etanol) e alguns subprodutos. É uma das mais importantes culturas energéticas de impacto socioeconômico no mundo, em que cerca de 75% da produção mundial de açúcar (sacarose) é originado da cana-de-açúcar onde, parte desse açúcar é usado na produção de etanol como combustível renovável e há ainda a cogeração de eletricidade a partir da biomassa residual desse processo (CRB, 2015; Santos et al., 2019).

Atualmente, a cana-de-açúcar tem exercido um papel ambiental muito importante, uma vez que é uma das culturas de bioenergia mais promissoras para reduzir a dependência de petróleo bruto e mitigar as emissões de gases de efeito estufa, haja vista que a queima de etanol como combustível reduz em 70% a emissão de CO₂ na atmosfera em relação à gasolina (CONAB, 2015; Jaiswal et al., 2017).

De acordo com dados da FAO (2018), a cana-de-açúcar é uma das commodities mais relevantes na economia mundial, sendo a terceira mais produzida. É cultivada em mais de 120 países, sendo o Brasil, atualmente, o maior produtor do mundial, produzindo 60% a mais que a Índia, segundo colocado (Aquino e Fermino, 2022). A cultura é de grande importância

socioeconômica e ambiental para o país, sendo cultivada por pequenos, médios e grandes produtores. De acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2020), o setor sucroalcooleiro gera cerca de 773 mil empregos diretos e vários outros empregos indiretos. A área cultivada na safra 2021/2022 foi de 8,3 milhões de hectares, com uma produção de 585,2 milhões de toneladas, já a produção de etanol originado da cana-de-açúcar foi de 26,8 bilhões de litros (CONAB, 2022).

Dentre os estados com maior produção cana-de-açúcar no Brasil, São Paulo destaca-se como maior produtor, com 298,5 milhões de toneladas, produzidas em uma área de 4,2 milhões de hectares, correspondente a 50,6% da área total cultivada com cana-de-açúcar no país. Na sequência, estão os Estados de Goiás (11,6% - 962,9 mil hectares), Minas Gerais (10,2% - 846,5 mil hectares), Mato Grosso do Sul (7,8% - 648,6 mil hectares), Paraná (6,3% - 522,9 mil hectares), Alagoas (3,7% - 307,7 mil hectares) e Pernambuco (2,6% - 217,4 mil hectares) (CONAB, 2022).

A produção de cana-de-açúcar tem um impacto significativamente positivo sobre o PIB per capita do município onde o cultivo se localiza, como também nos circunvizinhos (Moraes et al., 2016). A produção tem como produtos primários o açúcar e o etanol, e secundário o bagaço da cana que é uma matéria prima para a cogeração de energia, que reduz a utilização de energias fósseis (Tarumoto et al., 2015).

O bagaço da cana também é utilizado na alimentação animal e na indústria de papel. Além de produzir o álcool etanol, através da cana-de-açúcar também são produzidos outros tipos como: a aguardente, o licor, o rum, a vodka e etc., da cana-de-açúcar aproveita-se absolutamente tudo: bagaço, méis, tortas e resíduos de colheita que servem como matéria orgânica ao solo, e a vinhaça (resíduo da destilação do caldo para obtenção do etanol) que é rica em N, P, K, é utilizada para a fertirrigação no campo (Silva et al., 2012; UNICA, 2016).

A região Norte-Nordeste tem uma participação importante na geração de açúcar e álcool, representando com 11 Estados 8,71 e 6,65% do total do país, respectivamente (CONAB, 2022). Em Pernambuco, a safra 2021/2022 gerou uma produção de 12,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, representando 2,2% do total produzido no país e com produtividade média de 58,2 toneladas por hectare, valor abaixo da média nacional que é de 70,4 toneladas por hectare. Essa produção gerou como derivados 798,8 mil toneladas de açúcar e 370,3 mil litros de etanol, correspondentes a 2,3 e 1,4%, respectivamente, do total produzido no país.

No Estado de Pernambuco, a concentração da produção se dá na região da Zona da Mata Sul, Norte e Metropolitana de Recife. Em resumo, a Região da Mata Sul, que compreende 24

municípios, é responsável pela produção de 38,80% do total no estado, a Região da Mata Norte, com 19 municípios é responsável por outros 37,80% e as regiões Metropolitana e Agreste correspondem a 15,61% e 7,79%, respectivamente. De acordo com a CONAB (2020) a colheita manual predomina no estado, sendo correspondente a 95,7%, principalmente devido às condições topográficas.

2.2. Irrigação na cana-de-açúcar

A restrição hídrica é, talvez, a limitação mais comum para o crescimento e desenvolvimento das plantas, constituindo-se um importante fator seletivo na evolução destes organismos (Maia Júnior, 2017). O uso da irrigação na agricultura é um meio de suprir as necessidades hídricas das plantas em condições limitantes, destacando essa prática como uma estratégia fundamental para aumentar a produtividade das culturas (Marin et al., 2016).

A prática da irrigação nos cultivos agrícolas gera maior rendimento e proporciona melhor qualidade das culturas, bem como garante a segurança contra períodos de instabilidade pluviométrica. Nos cultivos de cana-de-açúcar, a irrigação é uma das principais alternativas para aumentar o rendimento desta cultura, principalmente em regiões com disponibilidade limitada de água (Scarpone et al., 2016). Segundo Dias e Sentelhas, (2019), a irrigação é uma importante estratégia para melhorar a produtividade e o teor de sacarose dos colmos, e ainda diminuir a mortalidade dos perfilhos. São vários os estudos científicos que comprovam a eficiência da irrigação em aumentar a produtividade da cana-de-açúcar em relação às culturas não irrigadas (Dias e Sentelhas, 2019; Perin et al., 2019; Marin et al., 2020; Dingre e Gorantiwar, 2021; Wanderley et al., 2021). Além disso, a irrigação da cana-de-açúcar reduz as variações interanuais na produção e os custos associados (Cardozo et al., 2016).

De acordo com Donzelli e Costa (2010), em cultivos irrigados de cana-de-açúcar existem basicamente três tipos de estratégias de programação da irrigação: 1 - irrigação “Saving” (salvação), que consiste em fornecer água às plantas durante os períodos mais críticos após o plantio ou brotação, com lâmina de irrigação variando de 30 a 60 mm geralmente utilizando águas oriundas de rios e/ou represas, residuais ou água misturada com vinhaça. Esta é uma prática comum nos canaviais brasileiros, mas geralmente é limitada às áreas próximas às usinas; 2 - irrigação por déficit, que consiste em aplicar parte da água necessária à cultura em fases críticas, como estabelecimento e perfilhamento, nesse caso são aplicadas de quatro a seis

irrigações de 40 a 60 mm; 3 - irrigação total, que corresponde ao suprimento de toda a água necessária à safra de cana durante o ciclo, exceto o amadurecimento (estratégia de secagem).

Doorenbos e Kassam (1994), relatam que, em regiões úmidas, a cana-de-açúcar produzida em sistema de sequeiro apresenta rendimentos 70 a 100 Mg ha⁻¹, já em regiões secas, em sistemas de cultivos irrigados, o rendimento varia de 100 e 150 Mg ha⁻¹, com demanda hídrica de 1.500 a 2.000 mm por ciclo de 365 dias. Devido à grande demanda hídrica da cana-de-açúcar para atingir altas produtividades surgem as preocupações ambientais com a escassez de água, uma vez que, em alguns países a expansão da cultura depende da irrigação (Scarpate et al., 2016; Cardozo et al., 2018). Nesse contexto, Singh et al. (2018) relatam que é pertinente melhorar a eficiência das práticas agrícolas, pois a produtividade de culturas com alta demanda hídrica, como a cana-de-açúcar, só pode ser sustentada melhorando a eficiência do uso da água de irrigação.

Considerando a demanda crescente por alimentos em função do aumento na população mundial, e um cenário de instabilidade climática, há necessidade de garantir o uso racional dos recursos naturais. Com isso, a agricultura irrigada precisa buscar meios para viabilizar a produção de alimentos seguindo os princípios da sustentabilidade. A água utilizada para fins de irrigação deve ser gerenciada de forma eficiente para minimizar os desperdícios e reduzir os custos, a fim de manter a sustentabilidade econômica do sistema (Mansour et al., 2017).

Entre as ferramentas disponíveis para o uso racional dos recursos hídricos tem-se o emprego da irrigação localizada por gotejamento que apresenta alta eficiência de aplicação ($\geq 90\%$) devido à redução nas perdas por escoamento superficial e por percolação profunda, o que resulta em economia de água e insumos nos cultivos agrícolas (INCID, 2006; Yan et al., 2019).

2.2.1. Gotejamento subsuperficial

Com a expansão do setor sucroalcooleiro surge a necessidade de implementar novas tecnologias e ferramentas, como a irrigação, capaz de proporcionar incrementos no rendimento e na qualidade da matéria prima. Os sistemas de cultivo de cana-de-açúcar de sequeiro estão sendo gradualmente substituídos por sistemas irrigados sempre que essa transição for possível. Além disso, sistemas de irrigação de baixa eficiência estão sendo substituídos pelos de alta eficiência, com intuito de tornar a atividade mais sustentável economicamente e ambientalmente (Gunarathna et al., 2018).

De acordo com Souza e Bizari (2018), o sistema de irrigação localizada por gotejamento pode ser utilizado para alcançar alta eficiência no uso de água e nutrientes pelas culturas. A utilização dessa técnica consiste em aplicar parte da água no solo em pequenos volumes, mas em alta frequência, diretamente na zona radicular, mantendo a umidade do solo o mais próximo possível da capacidade de campo (Bizari et al., 2016). A alocação das fitas de gotejo no momento da instalação classifica o sistema de irrigação por gotejamento, que pode ser do tipo superficial, quando os emissores estão dispostos na superfície do solo; e subsuperficial quando são alocados abaixo da superfície do solo (Souza e Bizari, 2018).

A irrigação por gotejamento subsuperficial (Subsurface Drip Irrigation - SDI) surgiu em Israel na década de 60, onde ocorreu a primeira instalação do SDI (Marques et al., 2006). Segundo Yao et al. (2011), esse sistema possibilita fornecimento de água às culturas pela aplicação de baixo volume, reduzindo as perdas hídricas, enquanto uma porção superficial do solo é mantida relativamente seca minimizando o desenvolvimento de plantas daninhas e as perdas por evaporação.

Os estudos sobre irrigação por gotejamento em cultivos de cana-de-açúcar surgiram na região do Havaí no ano de 1959, na Estação Experimental dos Plantadores de Cana-de-açúcar do Hawaii, onde foram implantados experimentos para testar a viabilidade desse sistema, e a partir da década de 70 iniciaram-se as instalações em plantios comerciais, sendo que no final de 1984 a área irrigada dessa cultura era de 45.400 hectares, e desse total, 34.800 hectares eram irrigados via gotejamento subsuperficial (Bui e Kinoshita, 1985).

No Brasil, os cultivos de cana-de-açúcar irrigados por gotejamento subsuperficial começaram a surgir no ano de 1996, com a instalação de experimentos da empresa Netafim em parceria com a Copersucar (Cooperativa Brasileira de Açúcar e Etanol) na usina São Martinho, em Pradópolis - SP, que tinha como objetivo avaliar variedades de cana-de-açúcar e suas produtividades potenciais submetidas a diferentes lâminas de irrigação por gotejamento subsuperficial (Aguar, 2002).

O uso da irrigação por gotejamento subsuperficial na cultura da cana-de-açúcar é uma grande evolução na tecnologia de produção, uma vez que aumenta o crescimento, o rendimento e a longevidade dos canaviais, devido à precisão na aplicação e no volume de água utilizado, bem como pela manutenção da aeração adequada da zona radicular (Gunarathna et al., 2018; Souza e Bizari, 2018). Esse sistema, desde que instalado e manejado adequadamente, pode promover economia no consumo de água e insumos, resultando em ganhos de produção e redução nos custos para produzir. Economia de água na margem de 31% foi obtida (Mahesh et

al., 2016; Dashtegol et al., 2020) ao se utilizar o gotejamento por subsuperfície em relação a irrigação por sulco.

Benefícios no cultivo de cana-de-açúcar foram constatados com a irrigação por gotejamento subsuperficial em comparação com a irrigação por gotejamento superficial, tais como: aumento na produtividade e na eficiência do uso da água (Mahesh et al., 2016; Gonçalves et al., 2017); aumento nas trocas gasosas, no potencial hídrico foliar, no teor foliar de Nitrogênio, Magnésio e de Clorofila (Gonçalves et al., 2017; Pires et al., 2018).

A associação da irrigação por gotejamento subsuperficial com uso da fertirrigação tem se mostrado uma estratégia vantajosa para os produtores de cana-de-açúcar, uma vez que os benefícios de ambas as técnicas se juntam e promovem incrementos na qualidade e na produtividade dos canaviais. A fertirrigação por gotejamento subsuperficial promove a eficácia no aproveitamento e recuperação dos fertilizantes aplicados, minimizando as perdas por meio de processos como desnitrificação, percolação profunda e escoamento, que podem ocorrer com outros métodos de irrigação (Gunarathna et al., 2018). De acordo com Pires et al. (2018), a irrigação por gotejamento em subsuperfície permite a aplicação dos nutrientes diretamente na zona radicular, sem provocar danos à cultura, possibilitando também aplicações em cobertura de forma racional e parcelada de acordo com a necessidade da cultura nos diferentes estádios de crescimento.

Entretanto, um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial apresenta alto custo de implantação, e requer um planejamento de instalação preciso, bem como um manejo adequado para o seu perfeito funcionamento. Uma vez que o sistema atenda esses requisitos, a probabilidade de retorno econômico é intensificada.

Como já apresentado, a principal vantagem desse sistema é o aumento na produtividade nos cultivos de cana-de-açúcar, no entanto, a prática está atrelada a outras vantagens, tais como: aplicação de água diretamente na zona radicular e devido a isso apresenta elevada uniformidade de aplicação e maior eficiência no uso da água, redução na perda de água por evaporação, escoamento superficial reduzido, possibilidade de aplicar a fertirrigação diretamente na zona de absorção radicular o que permite maior aproveitamento dos nutrientes e maior eficiência no uso dos fertilizantes, redução na incidência de plantas daninhas, redução na lixiviação de nitrato, menor incidência de pragas e doenças, maior flexibilidade no processo de colheita e redução nos danos ao sistema por maquinários agrícolas (Lamm e Camp, 2007; Pires et al., 2014; Gunarathna et al., 2018; Yao et al., 2021).

Contudo, a irrigação por gotejamento subsuperficial traz alguns inconvenientes como: alto custo de implantação, dificuldade para realizar o monitoramento bem como supervisionar os eventos de irrigação e realizar manutenções, baixo índice de brotamento se houver pouca movimentação capilar, salinidade direto na zona radicular, problemas com o espaçamento entre linhas e com a rotação de culturas, gestão da qualidade da água aplicada, entupimento e intrusão de raízes nos emissores, complexidade na instalação (Lamm e Camp, 2007; Kaushal et al., 2012; Yao et al., 2021).

2.3. Irrigação por pulsos

Diante da necessidade do uso racional dos recursos naturais e da busca por meios que garantam a segurança alimentar através da produção de alimentos de maneira eficiente. Desta forma, torna-se fundamental o desenvolvimento de técnicas e tecnologias que visem o aumento no rendimento e na qualidade das culturas enquanto utilizam recursos de maneira sustentável, especialmente os recursos hídricos, que são cada vez mais escassos devido à ocorrência frequente de crises hídricas (Silva et al., 2019). A irrigação por pulsos surge como uma técnica condizente com estas necessidades, pois promove um melhor aproveitamento da água aplicada, reduzindo as perdas de água por percolação, e conseqüentemente o volume de água aplicado, sem comprometer a produtividade da cultura (Zamora et al., 2019).

A irrigação por pulsos foi proposta inicialmente por Karmeli e Peri (1974), que sugeriram a técnica como meio de alcançar baixas taxas de aplicação de água em um sistema de irrigação com emissores com altas taxas de descargas. Os autores definiram irrigação por pulsos como uma série de ciclos de tempo de irrigação onde cada ciclo inclui duas fases, sendo uma fase de operação seguida por uma fase de repouso ou não operatória do sistema de irrigação. Portanto, essa técnica é fundamentada na redução da taxa e aumento da frequência de aplicação de água no solo, de modo a corresponder ao máximo possível com o processo de absorção de água pela planta (Eid et al., 2013; Phogat et al., 2013).

A irrigação por pulso tem sido empregada em regiões áridas e semiáridas, com a finalidade de reduzir as perdas de água nos sistemas de cultivos irrigados, bem como melhorar o rendimento das culturas e aumentar a eficiência do uso da água (Elhakim et al., 2020). Os benefícios da irrigação por pulsos estão associados, principalmente, a uma melhor distribuição da umidade na zona rizosférica. A irrigação por pulsos reduz a quantidade total de água necessária e resulta em uma distribuição heterogênea da umidade na região do sistema radicular,

fornecendo assim, condições desejáveis para o movimento da água no solo e para a absorção pelas raízes (Segal et al., 2006; Bakeer et al., 2009).

Os pulsos e os períodos de repouso proporcionam uma distribuição heterogênea e mais horizontal da água no perfil do solo, de forma que haja uma redução na percolação de água sob a zona radicular das plantas e que se formem estreitas camadas de solo com teor de umidade diferente, capaz de estimular melhorias nos mecanismos fisiológicos das plantas, resultando em aumento na eficiência do uso da água e de nutrientes e na produtividade das culturas (Dodd, 2009; Boyle et al., 2016; Elhakim et al., 2020; Puértolas et al., 2020; Stallmann et al., 2020; Hajirad et al., 2021).

Pesquisadores em diferentes regiões do mundo ao estudarem o uso dessa técnica em cultivos agrícolas, observaram que houve efeitos positivos em relação a melhorias na qualidade dos produtos, incrementos de produtividade e economia no uso da água. A esse respeito, Elnesr et al. (2015) estudando o efeito da irrigação intermitente no cultivo de tomate na Arábia Saudita, obtiveram melhorias no tamanho, na qualidade nutritiva e no grau de maturação dos frutos.

Huang et al. (2018) estudaram os efeitos da irrigação pulsada associada com doses de Nitrogênio na cultura do milho, e observaram que a irrigação pulsada aumentou o desenvolvimento radicular. Em estudos anteriores com irrigação de alta frequência, constatou-se que os eventos de irrigação afetaram a disponibilidade de água e de nutrientes, induzindo a melhorias na eficiência de absorção de nutrientes, especialmente aqueles caracterizados pela baixa mobilidade, como o Fósforo e os micronutrientes (Silber et al., 2003; Silber et al., 2005; Assouline et al., 2006; Silber et al., 2012).

Para Chai et al. (2016) os ciclos de secagem e umedecimento na zona radicular que a irrigação por pulsos pode propiciar, melhoram a capacidade das plantas de adquirir nutrientes do solo, pois há um estímulo fisiológico para as plantas garantirem os níveis necessários de nutrientes em seus tecidos vegetais, e também no processo de mineralização do Nitrogênio orgânico do solo, aumentando assim o Nitrogênio mineral disponível para as plantas.

Para a região do Egito, Eid et al. (2013), ao analisarem as implicações da irrigação por pulsos no cultivo de soja, verificaram efeitos positivos sobre a produção da cultura na utilização da irrigação por pulsos, com melhores desempenhos nas aplicações com 4 e 8 pulsos. Para a mesma região, Abdelraouf et al. (2013) estudando a aplicação da irrigação por pulsos no cultivo de batata, observaram que a produtividade da água aumentou com a aplicação de 4 pulsos de irrigação, mesmo com uma reposição de apenas 75% da evapotranspiração da cultura (ETc). Estudando os efeitos da irrigação por pulsos na cultura do morango, Cormier et al. (2020)

observaram que o crescimento e a produtividade dos morangueiros foram beneficiados por essa técnica.

Alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil constataram os benefícios da irrigação por pulso em algumas culturas, como para alface (Almeida et al., 2015) onde constatou-se economia de água de 25% quando não se utilizou cobertura morta no cultivo e 50% de economia de água em tratamentos com cobertura plástica sem acarretar em perdas na produção. Na cultura do coentro, Zamora et al. (2019) observaram que a irrigação por pulsos promoveu incremento na produtividade e uma economia de água de 40% durante o ciclo de cultivo. Menezes et al. (2020) observaram que a irrigação pulsada proporcionou redução no consumo de água pelas plantas de coentro sem comprometer o acúmulo de matéria seca e de nutrientes pela cultura.

Diante do exposto, a irrigação pulsada torna-se uma técnica viável e adequada para o uso racional dos recursos hídricos e para implantação de sistemas de cultivos agrícolas fundamentados na conservação e sustentabilidade da produção agrícola. No entanto, mesmo diante dos resultados promissores dessa técnica ainda há a necessidade de estudos que avaliem os efeitos da irrigação por pulsos sobre outras culturas de interesse econômico para as condições do Brasil, a exemplo da cultura da cana-de-açúcar.

2.4. Estresse hídrico

O crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas são comprometidos por situações de estresses devido a condições ambientais adversas que, frequentemente, as plantas são submetidas. Tais estresses podem ser bióticos (resultantes da ação insetos praga ou de microrganismos) e abióticos (resultantes do excesso ou déficit de algum fator físico ou químico do ambiente), podendo ocorrer de forma isolada ou concomitante (Gonçalves et al., 2010).

Entre os estresses abióticos destacam-se a salinidade, o estresse hídrico, o estresse proporcionado pelo excesso de nutrientes minerais causando toxicidade às plantas, luminosidade e temperaturas (altas ou baixas). O estresse hídrico é caracterizado tanto pela ocorrência do déficit hídrico, quanto pelo excesso de água disponível para as plantas, proveniente de drenagem deficiente ou aplicação excessiva de água de irrigação. Nas plantas, a água é o recurso essencial mais restritivo para a produtividade agrícola, devido sua importância a distintos processos metabólicos, sobretudo no período inicial de desenvolvimento das culturas (Cambráia, 2005; Fernandes et al., 2015).

O estresse hídrico causado pelo excesso de água é recorrente e importante podendo levar a reduções na produtividade, encarecimento da produção e, conseqüentemente, redução no retorno econômico dos cultivos (Misra et al., 2020). O excesso de água nas plantas causa efeitos como: redução da respiração, metabolismo fermentativo, produção inadequada de ATP (adenosina trifosfato), produção de EROs (espécies reativas de oxigênio), fechamento estomático e, também, ocorrência de produção de toxinas por microrganismos anaeróbicos (Taiz et al., 2017).

A planta pode sofrer danos por excesso ou por falta de água, contudo, na natureza, o estresse por insuficiência de água (condição de déficit hídrico) é mais comum, ocasionando alterações nos mecanismos fisiológicos das plantas (Angelocci, 2002). Em plantas sob déficit hídrico pode-se observar efeitos como: redução da expansão celular e/ou foliar, redução das atividades celulares e metabólicas, fechamento estomático, inibição da atividade fotossintética, queda foliar, alteração na partição do carbono, desestabilização de membranas e de proteínas e, por fim a morte celular (Taiz et al., 2017).

Nos diversos sistemas de cultivos agrícolas, o déficit hídrico é um dos principais estresses abióticos que limitam a qualidade e quantidade dos produtos agrícolas. De acordo com Monteiro et al. (2014), o estresse ocasionado por deficiência hídrica se destaca por ser comum nos ecossistemas e por ocasionar sérias disfunções nas plantas, sejam eles pelo decréscimo de turgor das células, que é essencial nos processos metabólicos e/ou por causar alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, refletindo-se sobre o transporte e absorção de água e nutrientes pelos vegetais.

O principal impacto da restrição hídrica é a limitação no crescimento e no desenvolvimento das plantas, devido ao conflito entre conservação do status hídrico e a assimilação de CO₂. Isto compromete diretamente a produção e a translocação de fotoassimilados, devido às limitações no processo de fotossíntese, e também a produção e a alocação de matéria seca vegetal devido a limitações nos processos de alongamento celular e expansão foliar (Oliveira et al., 2016).

Na produção de cana-de-açúcar, a limitação hídrica tem sido um desafio, principalmente quando ocorre na fase de perfilhamento e nas fases iniciais de crescimento, que são responsáveis por 80% da produção (Machado et al., 2009; Bezerra et al., 2019). De acordo com Farag et al. (2018), a cana-de-açúcar tem uma alta demanda por água e quando exposta a condições hídricas limitantes, o seu crescimento e desenvolvimento podem ser severamente retardados. Segundo Marcos et al. (2018), a primeira resposta fisiológica da cana-de-açúcar

quando exposta ao déficit hídrico é a produção de ácido abscísico, hormônio que induz o fechamento estomático e, conseqüentemente, a redução da perda de água por transpiração.

Sob condição de déficit hídrico e em conjunto com o fechamento estomático, outras respostas físicas são desencadeadas como o enrolamento de folhas, restrição do crescimento de colmos e folhas, senescência foliar e redução da área foliar, interrupção na divisão celular e no alongamento do caule (Marcos et al., 2018; Garcia et al., 2020). Segundo Puértolas et al. (2020), o acúmulo de biomassa por meio da fotossíntese acontece devido a uma compensação entre a perda de água e a fixação de CO₂, com os estômatos sendo responsáveis pela otimização da razão de assimilação de CO₂ por unidade de água perdida. Portanto, o fechamento estomático limita o balanço positivo de CO₂ intracelular e, conseqüentemente, compromete o crescimento, desenvolvimento e a produtividades dos canaviais sob condições de restrição hídrica.

Os efeitos da restrição hídrica a nível celular são ampliados e verificados nas características morfológicas da cana-de-açúcar. De acordo com Khaled et al. (2018), na cultura da cana-de-açúcar o estresse hídrico é o principal fator abiótico que compromete parâmetros morfológicos das plantas como, e.g., diâmetro e comprimento do colmo, área foliar e número de perfilhos.

Em regiões como o Nordeste brasileiro, que possui características climáticas com períodos de estiagem ou distribuição irregular de chuvas, pode haver reduções na produtividade da cana-de-açúcar ou até mesmo tornar o seu cultivo impraticável (Santos et al., 2019). Assim, o uso da irrigação como meio de suprir as necessidades hídricas das culturas torna-se ferramenta imprescindível para garantir a produção agrícola.

Entretanto, no contexto do uso racional dos recursos hídricos, é importante o gerenciamento preciso da água para fins de irrigação (Dingre e Gorantiwar, 2021). Desse modo, a utilização de técnicas que visem mitigar os efeitos negativos do estresse hídrico, garantindo a produtividade e a qualidade satisfatória da cultura e que possibilite ainda a economia de insumos, torna-se necessárias para o desenvolvimento sustentável da agricultura.

2.5. Crescimento e componentes de produção da cana-de-açúcar sob estresse hídrico

Uma planta, quando submetida a uma condição de estresse, apresenta modificações morfológicas em suas estruturas, como forma de se proteger ao adaptar-se às condições desfavoráveis impostas pelo meio no qual ela encontra-se. O déficit hídrico é uma das limitações ambientais mais comuns, e pode comprometer o crescimento das plantas resultando

em restrições no alongamento e divisão celular (Silva et al., 2012; Anjos et al., 2018). Dessa forma, as suas características biométricas, quando analisadas adequadamente, podem representar o nível do estresse sofrido pelas plantas e servindo de ferramenta para auxiliar na previsão da qualidade e produtividade da cultura (Oliveira et al., 2016; Misra et al., 2020).

A cana-de-açúcar é uma cultura que apresenta alta taxa de conversão energética, o que a torna muito efetiva para a produção de biomassa (Barbosa et al., 2015a). No entanto, limitações ambientais provocam impactos negativos no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade dessa cultura. Características morfológicas como a altura de plantas, diâmetro do colmo, número de folhas verdes e a área foliar podem ser severamente comprometidas em situações de limitação hídrica, resultando em reduções no crescimento da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, afetando seu desenvolvimento e rendimento (Silva et al., 2012; Maia Júnior et al., 2018).

De acordo com Abreu et al. (2013), se houver déficit hídrico nas fases de iniciais de brotação, perfilhamento e crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, o crescimento dos colmos fica limitado e ocorre redução direta na produtividade. Estudos demonstram os efeitos negativos do déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar, como aquele obtido por Sousa et al. (2017) que observaram redução no perfilhamento e no acúmulo de biomassa de colmo, refletindo-se diretamente em redução na produtividade; Santos et al. (2019) obtiveram redução de biomassa, e Khaled et al. (2018) obtiveram redução no peso e na altura das plantas.

Misra et al. (2020) obtiveram reduções na altura das plantas, no comprimento de internódio, na área foliar e no peso das raízes. Os autores afirmaram que essas reduções nas qualidades morfológicas contribuíram para a obtenção de maiores perdas na produtividade e no rendimento da cultura.

A produção de perfilhos na cana-de-açúcar é determinante para o número de colmos e para a produtividade. De acordo com Farag et al. (2018), a capacidade de perfilhamento e a subsequente eficiência de crescimento determinam em grande parte o rendimento de um canavial.

Embora nos cultivos de cana-de-açúcar sejam comprovados os efeitos negativos do estresse hídrico, o desenvolvimento de ferramentas que visem à sustentabilidade do sistema de produção sob essas condições possibilita a obtenção de rendimentos satisfatórios e redução nos custos com água e insumos. Marcos et al. (2018) afirmam que a tolerância da cana-de-açúcar ao déficit hídrico pode ser induzida ou melhorada sob condições de manejo de irrigação economizando água e energia.

2.6. Nutrição mineral da cana-de-açúcar

O desenvolvimento vegetal e a produção de biomassa de uma planta estão diretamente relacionados com as condições edafoclimáticas no qual ela se encontra, tais como disponibilidade hídrica, nutricional e fotossintética. No que diz respeito ao suprimento nutricional, a quantidade de nutrientes extraídos do solo e acumulados no tecido vegetal variam com a cultivar, manejo do solo, ciclo da cultura e dos nutrientes disponíveis para o desenvolvimento das plantas (Benett et al., 2013).

A extração de nutrientes depende de fatores externos, que estão relacionados com o ambiente de cultivo, e também de fatores internos, como o potencial genético e a idade da planta. As informações em relação à extração de nutrientes pelas plantas, em diferentes níveis de produtividade, devem ser levadas em consideração para que se possa definir o manejo adequado da fertilidade do solo na propriedade, explorando ao máximo o potencial produtivo da cultura (Bertsch, 2003; Santos et al., 2014).

A exigência nutricional de uma cultura refere-se à quantidade de nutrientes extraídos do solo, adubo e do ar e acumulados pelas plantas para atender suas necessidades e completar seu ciclo de vida (Malavolta et al., 1997; Malavolta, 2006; Epstein e Bloom, 2006). Atender adequadamente as exigências nutricionais de uma cultura permite corrigir fatores que estariam limitando o seu crescimento e a sua produção.

Nos cultivos de cana-de-açúcar, o aumento da produção de biomassa pela cultura, está diretamente relacionado à maior extração e acúmulo de nutrientes do solo (Salviano et al., 2017). De acordo com Coleti et al. (2006), conhecer a exportação e o acúmulo de nutrientes pelas culturas é de fundamental importância para a aplicação eficiente dos adubos, pois determina a quantidade de nutrientes que deve ser fornecida para o atendimento da demanda nutricional da cultura.

Coelho e Verlengia (1973) relatam que a absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar até o quinto mês de idade é pequena, aumentando intensamente daí em diante, chegando ao nono mês contendo 50% de Potássio, Cálcio e Magnésio e um pouco mais de 30% de Nitrogênio, Fósforo e Enxofre do total que absorve durante o ciclo vegetativo; do nono ao décimo segundo mês a absorção de Nitrogênio é ainda mais intensa, acumulando 90% do total extraído pela planta; o Fósforo é absorvido durante todo ciclo da planta.

Analisando parâmetros nutricionais em variedades de cana-de-açúcar sob cultivo irrigado, Oliveira et al. (2010a) obtiveram valores médios para extração e exportação de N, P, K, Ca e Mg na parte área da cultura de 179, 25, 325, 226 e 87 kg ha⁻¹, respectivamente, e uma

ordem decrescente de acúmulo desses macronutrientes de $K > Ca > N > Mg > P$. De acordo Malavolta et al. (1997) a quantidade de nutrientes extraída por uma tonelada de cana é de 1,20; 0,36; 1,48; 1,12; 0,68 e 0,36 kg de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente.

Em relação aos micronutrientes, Orlando Filho et al. (2001) propõe uma ordem decrescente de acúmulo de $Fe > Mg > Zn$. Benett et al. (2013) em seus estudos, encontraram a seguinte ordem decrescente de micronutrientes $Fe > Mg > Zn > B$, com acúmulo médio de 1,40; 1,28; 0,76 e 0,44 kg ha⁻¹, respectivamente.

A cana-de-açúcar retira do solo e aloca em seus tecidos vegetais uma grande quantidade de nutrientes. De acordo com dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas - ANDA (2016), no Brasil, a cultura da cana de açúcar apresenta consumo estimado de 3,44 milhões de toneladas de fertilizantes, sendo responsável pelo consumo de cerca de 16% de todo o adubo comercializado no Brasil. Diante de números tão expressivos destaca-se a necessidade de administrar de forma racional e eficiente a fertilização dos canaviais visando redução no uso de insumos e nos custos de produção.

O conhecimento do balanço nutricional é importante para a elaboração de estratégias de fertilização eficientes nos canaviais. Informações sobre a alocação dos nutrientes nos diferentes compartimentos da planta é a base para entender a ciclagem nutricional e assim elaborar planos de adubação mais eficazes de modo a reduzir as perdas de insumos e garantir a viabilidade econômica da produção. Oliveira et al. (2010b) obtiveram teores de nutrientes alocados em colmo, folhas e ponteiro da cana-de-açúcar, respectivamente de 92,0; 31,1 e 48,7 kg ha⁻¹ para N, 14,8; 4,88 e 5,70 kg ha⁻¹ para P, 188,4; 81,7 e 55,5 kg ha⁻¹ para K, 186,7; 24,5 e 15,2 kg ha⁻¹ de Ca e 66,0; 14,2 e 6,7 kg ha⁻¹ de Mg.

A variação de fatores ambientais como temperatura e umidade do solo influencia tanto na disponibilidade dos nutrientes como na absorção destes pelas raízes e, conseqüentemente, o crescimento da parte aérea (Marschner, 2012; Costa et al., 2019). Em condições de déficit hídrico a absorção de nutrientes pelas plantas diminui, uma vez que a água é o veículo por meio do qual os íons predominantemente se movimentam da solução do solo para o sistema radicular, principalmente para aqueles cuja principal via de contato do nutriente com as raízes se dá por fluxo de massa. Assim, a restrição hídrica no solo leva, obrigatoriamente, à deficiência de vários nutrientes (Novais et al., 1990).

O desenvolvimento de técnicas que visem amenizar os impactos do déficit hídrico, de modo que não interfira no fornecimento de nutrientes para as plantas, podem proporcionar equilíbrio nutricional para garantir uma produtividade satisfatória bem como melhor qualidade

dos produtos. A esse respeito, Oliveira et al. (2010b) afirmam que o desenvolvimento de pesquisas que visem a quantificação e a alocação de nutrientes nos compartimentos da parte aérea da cana-de-açúcar são necessárias e fornecerão informações fundamentais para o correto manejo nutricional dos canaviais, servindo como suporte para a agroindústria sulcroatoolceira.

2.7. Aspectos fisiológicos

A cana-de-açúcar possui metabolismo fotossintético do tipo C4, de forma simplificada, a função desta via é transportar o CO₂, proveniente da atmosfera, das células do mesófilo para as células da bainha vascular nas folhas. Isso acarreta uma alta concentração de CO₂ no sítio ativo da ribulosebifosfato carboxilase oxigenase (RUBISCO) aumentando sua eficiência de assimilação do CO₂ e praticamente inibindo por completo a fotorrespiração. Como consequência, proporciona que as plantas C4 apresentem altas taxas fotossintéticas em relação às plantas C3, sendo este o principal motivo da cultura da cana-de-açúcar ser altamente produtiva (Furbank et al., 2000; Gonçalves et al., 2017).

Restrições ambientais, tais como o déficit hídrico, podem reduzir a eficiência da conversão de luz pelas plantas. Em um ambiente, cuja oferta de água seja restrita, as plantas são expostas a um estresse metabólico e tendem a limitar a eficiência fotossintética e, conseqüentemente, o seu desenvolvimento e a sua capacidade produtiva. Isso ocorre devido ao papel importante que a água desempenha no metabolismo das plantas, de modo que a sua indisponibilidade no solo causa a redução do potencial hídrico das folhas, diminuindo as trocas gasosas e afetando negativamente a assimilação de CO₂ (Taiz et al., 2017; Puértolas et al., 2020).

A principal causa da redução na assimilação de CO₂ em cana-de-açúcar sob déficit hídrico é o comprometimento das reações bioquímicas da fotossíntese, afetando a eficiência da conversão de energia luminosa em biomassa. Neste momento, é importante mencionar que o déficit hídrico reduz a produção de biomassa devido à baixa atividade fotossintética do dossel das plantas, que é resultado do comprometimento das atividades metabólicas e conseqüentemente da redução na área foliar (Barbosa et al., 2015b).

De acordo com Machado et al. (2009), quando solo apresenta baixa disponibilidade de água, as trocas gasosas da cana-de-açúcar são afetadas em todos os estágios de desenvolvimento, influenciadas pelo menor potencial hídrico foliar, reduzindo a produção de biomassa pelos colmos e a produção de açúcar. Em estudos realizados por Gonçalves et al.

(2010), com a cultura da cana-de-açúcar no estágio de desenvolvimento vegetativo inicial, os autores concluíram que a deficiência hídrica provocou reduções significativas na condutância estomática, na transpiração foliar, na fotossíntese líquida e na eficiência de uso da água pelas plantas.

Alterações nas trocas gasosas das plantas em resposta a condições de déficit hídrico, acarretam em fechamento estomático, sendo esse processo diretamente induzido pelas condições hídricas, tanto do solo quanto das folhas (Zivcak et al., 2013). O fechamento estomático compromete a assimilação fotossintética do carbono, podendo afetar o crescimento e a produtividade das culturas ocorrendo, portanto, uma limitação da condutância estomática, o que resulta na diminuição da concentração intracelular de CO₂ (Zivcak et al., 2013; Silva et al., 2015).

De acordo com Gonçalves et al. (2010), a cultura da cana-de-açúcar cultivada sob estresse hídrico apresenta redução na condutância estomática que promove concomitantemente redução na transpiração durante o período de estresse. A transpiração é o principal mecanismo envolvido na regulação da temperatura das folhas. Quando a transpiração é reduzida, a folha perde a capacidade de resfriamento e aumenta sua temperatura, uma vez que continua recebendo luz. A perda de vapor de água realizada na transpiração contribui para dissipação de calor, controlando as condições térmicas da planta, que podem em altas temperaturas no ambiente ou em deficiência hídrica, causar danos irreversíveis à planta (Araújo et al., 2010; Vieira et al., 2014; Saraiva et al., 2014).

A atividade fotossintética nos cloroplastos das células foliares apresenta como produto final açúcares, a exemplo da sacarose. Na cana-de-açúcar, o colmo constitui-se num reservatório onde, em condições favoráveis à maturação, é acumulada grande quantidade de sacarose. A taxa de acúmulo de sacarose é maior durante a última fase do ciclo da cultura, coincidindo com períodos de restrição climática (temperaturas amenas e baixa disponibilidade hídrica) que induzem à maturação (Almeida et al., 2008; Abreu et al., 2013).

REFERÊNCIAS

- Abdelraouf, R. E., Abou-Hussein, S. D., Marzouk, N. M., Elbegawy, M. K. H. Effect of pulse drip irrigation technology on the economical parameters of potato production under organic agriculture. *Journal of Applied Sciences Research*, v. 9, p. 601-611, 2013. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2013.45036>.
- Abreu, M. L., Silva, M. A., Teodoro, I., Holanda, L. A., Sampaio Neto, G. D. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. *Bragantia*, v. 72, n. 3, p. 262-270, 2013. <https://doi.org/10.1590/brag.2013.028>.
- Aguiar, F. Gotejamento enterrado é novidade na irrigação da cana. *Agriannual 2002*, São Paulo, 2002, 256p.
- Almeida, W. F., Paz, V. P. S., Jesus, A. P. C., Silva, J. S., Gonçalves, K. S., Oliveira, A. S. Yield of green beans subjected to continuous and pulse drip irrigation with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 7, p. 476-481, 2018. <https://doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p476-481>.
- Almeida, H. J., Pancelli, M. A., Prado, R. M., Cavalcante, V. S., Cruz, F. J. R. Effect of potassium on nutritional status and productivity of peanuts in succession with sugarcane. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 15, n. 1, p. 1-10, 2015. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000001>
- Almeida, A. C. S., Souza, J. L., Teodoro, I., Barbosa, G. V. S., Moura Filho, G., Ferreira Júnior, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500013>.
- Altpeter, F., Oraby, H. Sugarcane. In: *Genetic modification of plants*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 453-472.
- ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas (Brasil). *Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes*: São Paulo: ANDA, 2016, 90p.
- Angelocci, L. R. Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico. Edição do autor. Piracicaba: Departamento de Ciências Exatas ESALQ/USP, 2002. 101p.

- Anjos, E. U., Ferreira, V. M., Silva, J. V., Lima, C. L. C., Novais, R. C. Análise de crescimento de genótipos da cana-de-açúcar sob diferentes regimes hídricos. IN: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia - CONTECC'2018, Maceió, 2018. Disponível em: http://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/agronomia/17_adcdgdcsd rh.pdf. Acesso em: março de 2020.
- Aquino, G. S., Fermino, E. C. The NPK1 gene increases sugarcane productivity under water deficit and conventional crop management conditions. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, p. 102454, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102454>.
- Araújo, S. A. C., Vasquez, H. M., Campostrini, E., Torres Netto, A., Deminicis, B. B., Lima, E. S. Características fotossintéticas de genótipos de capim-elefante anão (*Pennisetum purpureum* Schum.) em estresse hídrico. *Acta Scientiarum*, v. 32, n. 1, p. 1-7, 2010. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v32i1.8961>.
- Assouline, S., Möller, M., Cohen, S., Ben-Hur, M., Grava, A., Narkis, K., Silber, A. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, p. 1556-1568, 2006. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0365>.
- Bakeer, G. A. A., El-Ebabi, F. G., El-Saidi, M. T., Abdelghany, A. R. E. Effect of pulse drip irrigation on yield and water use efficiency of potato crop under organic agriculture in sandy soils. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, v. 26, p. 736-765, 2009. <https://doi.org/10.21608/mjae.2009.109488>.
- Barbosa, A. M., Guidorizi, K. A., Catuchi, T. A., Marques, T. A., Ribeiro, R. V., Souza, G. M. Biomass and bioenergy partitioning of sugarcane plants under water deficit. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 37, n. 142, p. 1-8, 2015a. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1887-7>.
- Barbosa, A. M., Guidorizi, K. A., Catuchi, T. A., Marques, T. A., Ribeiro, R. V., Souza, G. M. Biomass and bioenergy partitioning of sugarcane plants under water deficit. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 37, n. 142, p. 1-8, 2015b. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1887-7>.
- Batista, E. L. S., Zolnier, S., Ribeiro, A., Lyra, G. B., Silva, T. G. F., 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, n. 2, p. 215-229, 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n2p215-229/2015>.

- Benett, C. G. S., Buzetti, S., Benett, K. S. S., Teixeira Filho, M. C. M., Costa, N. R., Maeda, A. S., Andreotti, M. Acúmulo de nutrientes no colmo de cana-de-açúcar em função de fontes e doses de manganês. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 34, n. 3, p.1077-1088, 2013. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n3p1077>.
- Bertsch, F. Absorción de nutrimentos por los cultivos. San José, Costa Rica, ACCS, 2003. 307p.
- Bezerra, B. K. L., Lima, G. P. P., Reis, A. R., Silva, M. A., Camargo, M. S. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 41, p. 189, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>.
- Bizari, D. R., Grecco, K. L., Souza, C. F. Bulbo molhado estimado pela técnica da TDR na irrigação por gotejamento subsuperficial. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 10, n. 2, p. 477-485, 2016. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v10n200352>
- Boyle, R. K. A., McAinsh, M., Dodd, I. C. Daily irrigation attenuates xylem abscisic acid concentration and increases leaf water potential of *Pelargonium × hortorum* compared with infrequent irrigation. *Physiologia Plantarum*, v. 158, p. 23-33, 2016. <https://doi.org/10.1111/ppl.12433>.
- Braga Junior, R. L. C., Landell, M. G. A., Silva, D. N., Bidoia, M. A. P., Silva, T. N., Silva, V. H. P., Rodrigues, P. E., Carregari, H. R., Luz, A. M., Anjos, I. A. Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil: safra 2019/20 e na região Centro-Sul - safra 2020/21. (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 226). 2021. 63p.
- Bui, W., Kinoshita, C. M. A irrigação por gotejamento no Haváí atendeu às expectativas? In: Congresso Internacional De Irrigação Por Gotejamento. 3 Ed. Fresno: American Society of Agricultural Engineers, 1985. p. 84-90.
- Cambraia, J. Aspectos bioquímicos, celulares e fisiológicos dos estresses nutricionais em plantas. In: Nogueira, R. J. M. C., Araújo, E. L., Willadino, L. G., Cavalcante, U. M. T. 1 Ed. Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas. Recife: UFRPE, 2005. Cap. 2, p. 95-104.
- Cardozo, N. P., Bordonal, R. O., Scala Júnior, N. L. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. *Journal of Cleaner Production*, v. 204, p. 861-871, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>.

- Cardozo, N. P., Bordonal, R. O., Scala Júnior, N. L. Greenhouse gas emission estimate in sugarcane irrigation in Brazil: is it possible to reduce it, and still increase crop yield? *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 3988-3997, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.040>.
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H. L., Waskom, R. M., Niu, Y., Siddique, K. H. M. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 36, p. 3, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>.
- Coelho, F. S., Verlengia, F. *Fertilidade do solo*. 2.Ed. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 384p.
- Coleti, J. T., Casagrande, J. C., Stupiello, J. J., Ribeiro, L. D., Oliveira, G. R. Remoção de macronutrientes pela cana planta e cana soca, em Argissolos, variedades RB83486 e SP813250. *Revista STAB*, v. 24, n. 5, p. 32-36, 2006.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Quarto Levantamento: Safra 2021/2022. CONAB, Brasília, Brasil, v. 8, n. 4, 2022.
- CONAB - Companhia Brasileira de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Segundo levantamento: Safra 2020/2021. CONAB, Brasília, Brasil, v. 7, n. 2, p. 1-64, 2020.
- CONAB - Companhia Brasileira de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Primeiro levantamento: Safra 2015/2016. CONAB, Brasília, Brasil, v. 2, n. 1, 2015.
- Cormier, J., Depardieu, C., Letourneau, G., Boily, C., Gallichand, J., Caron, J. Tensiometer-based irrigation scheduling and water use efficiency of field-grown strawberries. *Agronomy Journal*, v. 112, p. 2581-2597, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20205>.
- Costa, A. R. F. C., Rolim, M. M., Simões Neto, D. E., Silva, M. M., Silva, G. F., Pedrosa, E. M. R. Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. *Irriga*, v. 24, n. 1, p. 38-53, 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n1p38-53>.
- CRB - Commodity Research Bureau. *Yearbook 2015: The Book of Record for Commodity Markets*. Fundamental Market Research, Chicago, 2015.
- Daniels, J., Roach, B. T. Taxonomy and evolution. In: Heinz, D. J. 11 Ed. *Sugarcane improvement through breeding*. Amsterdam: Etherlands, 1987, p. 7.84.

- Dashtegol, A. S., Naseri, A. A., Nasab, S. B. Effects of Subsurface Drip Irrigation and Furrow Irrigation Management on Growth Variables and Root Distribution in Sugarcane Cultivation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, v.14, p.535-547, 2020. Recuperado de http://idj.iaid.ir/article_110739.html?lang=en
- Dias, H. B. Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil. 2016. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP. 2016.
- Dias, H. B., Sentelhas, P. C. Dimensioning the Impact of Irrigation on Sugarcane Yield in Brazil. *Sugar Tech*, v. 21, n. 1, p. 29-37, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0619-x>.
- Dingre, S. K., Gorantiwar, S. D. Soil moisture based deficit irrigation management for sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in semiarid environment. *Agricultural Water Management*, v. 245, n. 9, p. 106549, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106549>.
- Diola, V., Santos, F. Fisiologia. In: Santos, F.; Borém, A.; Caldas, C. Eds. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool - tecnologia e perspectivas. Viçosa: UFV, 2010. Cap. 4, p. 24-49.
- 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, n. 7, p. 100027, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100027>.
- Dodd, I. C. Rhizosphere manipulations to maximize “crop per drop” during deficit irrigation. *Journal of Experimental Botany*, v. 60, p. 2454-2459, 2009. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp192>.
- Donzelli, J. L., Costa, V. M. Workshop - Impacto da produção de etanol no balanço hídrico nas regiões de expansão. CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, p. 1-2, 2010.
- Doorenbos, J., Kassan, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33), 1994. 306p.
- Eid, A. R., Bakry, B. A., Taha, M. H. Effect of pulse drip irrigation and mulching systems on yield, quality traits and irrigation water use efficiency of soybean under sandy soil conditions. *Agricultural Sciences*, v. 4, n. 5, p. 249-261, 2013. <https://doi.org/10.4236/as.2013.45036>.

- Elhakim, A. A., Elmeadawy, M., El-Sybaee, I., Egela, M. Effect Use of Pulsed Deficit Drip Irrigation for Tomato Crop in Greenhouse powered by solar energy. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, v. 38, p. 1-10, 2020. <https://doi.org/10.21608/mjae.2020.48883.1014>.
- Elnesr, M. N., Alazba, A. A., Zein, A. I., El-Adl, M. M. Evaluating the effect of three water management techniques on tomato crop. *PLoS ONE*, v. 10, n. 6, p. 1-17, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129796>.
- Epstein, E., Bloom, A. *Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas*. 2 Ed. Editora Planta: Londrina. 2006. 404p.
- FAO - Food and Agriculture Organization Of The United Nation. FAOSTAT: statistical database. Rome: Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nation. *OECD-FAO Agricultural Outlook: 2018-2027*. 2018. Disponível em: http://www.fao.org/3/i9166e/i9166e_Chapter5_Sugar.pdf. Acesso em: 12 janeiro de 2022.
- Farag, S. E., Silva, M. A., Garcia, N. S., Enciso, J., Silva, J. An agronomic approach to screen sugar and energy cane genotypes for drought tolerance. *African Journal of Agricultural Research*, v. 13, p. 1220-1226, 2018. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13144>.
- Fernandes, E. T., Cairo, P. A. R., Novaes, A. B. Respostas fisiológicas de clones de eucalipto cultivados em casa de vegetação sob deficiência hídrica. *Revista Ciência Rural*, Santa Maria, v. 45, n. 1, p. 29-34, 2015. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20120152>.
- Ferraro, D. O., Rivero, D. E., Ghera, C. M. An analysis of the factors that influence sugarcane yield in Northern Argentina using classification and regression trees. *Field Crops Research*, v. 112, n. 3, p. 149-157, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.02.014>
- Furbank, R. T., Hatch, M. D., Jenkins, C. L. D. C4 photosynthesis: mechanism and regulation. In: Leegood, R. C., Sharkey, T. D., Von, C. S. *Photosynthesis: physiology and metabolism*. Netherlands: Academic Publishers, 2000, Cap. 3, p. 435-457.
- Garcia, F. H. S., Mendonça, A. M. C., Rodrigues, M., Matias, F. I., Silva Filho, M. P., Santos, H. R. B., Taffner, J., Barbosa, J. P. R. A. D. Water deficit tolerance in sugarcane is dependent on the accumulation of sugar in the leaf. *Annals of Applied Biology*, v. 176, p. 65-74, 2020. <https://doi.org/10.1111/aab.12559>.

- Gonçalves, I. Z., Barbosa, E. A. A., Santos, L. N. S., Nazário, A. A., Feitosa, D. R. C., Tuta, N. F., Matsura, E. E. Water relations and productivity of sugarcane irrigated with domestic wastewater by subsurface drip. *Agricultural Water Management*, v. 185, p. 105-115, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.01.014>
- Gonçalves, E. R., Ferreira, V. M., Silva, J. V., Endres, L., Barbosa, T. P., Duarte, W. G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 4, p. 378-386, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000400006>.
- Gunarathna, M. H. J. P., Sakai, K., Nakandakari, T., Momii, K., Onodera, T., Kaneshiro, H., Uehara, H., Wakasugi, K. Optimized Subsurface Irrigation System: The Future of Sugarcane Irrigation. *Water*, v. 10, p. 1-14, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10030314>.
- Gupta, V.; Raghuvanshi, S.; Gupta, A.; Saini, N.; Gaur, A.; Khan, M. N.; Gupta, R. S.; Singh, J.; Duttamajumder, S. K.; Suman, A.; Khurana, J. P.; Kapur, R.; Tyagi, A. K. The water-deficit stress- and red-rot-related genes in sugarcane. *Functional Integrative Genomics*, v.10, n.2, p.207-214, 2010.
- Hajirad, I., Mirlatifi, S. M., DehghaniSanij, H., Mohammadi, S. Effects of different pulsed drip irrigation levels on the yield and water productivity of silage maize. *Water and Irrigation Management*, v. 67, p. 87-98, 2021. <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.306782.807>.
- Heerden, P. D. R. V., Donaldson, R. A., Watt, D. A., Singels, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. *Journal of Experimental Botany*, v. 61, n. 11, p. 2877-2887, 2010. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq144>.
- Hitchcock, A. S. Type species of the first 100 genera of Linnaeus "Species" plantarum. *American Journal of Botany*, v. 10, n. 9, p. 510-514, 1923.
- Huang, L., Yang, P., Ren, S., Cui, H. Effects of continuous and pulse irrigation with different nitrogen applications on soil moisture, nitrogen transport and accumulation in root systems. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 11, p. 139-149, 2018. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181105.3674>.
- INCID. Drip Irrigation-Prospects and Coverage in India. Published by Indian National Committee on Irrigation and Drainage, Ministry of Water Resources, New Delhi, 2006. Disponível em: <http://worldcat.org/identities/lccn-no2001001570/>. Acesso em outubro de 2021.

- Jadoski, C. J., Toppa, E. V. B., Julianetti, A., Hulshof, T., Ono, E. O., Rodrigues, J. D. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, v. 3. n. 2, p. 169-175, 2011.
- Jaiswal, D., Souza, A. P., Larsen, S., Lebauer, D. S., Miguez, F. E., Sparovek, G., Bollero, G., Buckeridge, M. S., Long, S. P. Brazilian sugarcane ethanol as an expandable green alternative to crude oil use. *Natures Climate Change*. v. 7, p. 788-792, 2017. <https://doi.org/10.1038/nclimate3410>.
- Karmeli, O., Peri, G. Basic Principles of Pulse Irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, v. 100, n. 3, p. 309-319, 1974. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000988>.
- Kaushal, A., Patole, R., Singh, K. G. Drip irrigation in sugarcane: A review. *Agricultural Reviews*, v. 33, p. 211-219, 2012.
- Khaled, A., El-Arabi, N. I., Sabry, M. N., El-Sherbin, S. Sugarcane Genotypes Assessment Under Drought Condition Using Amplified Fragment Length Polymorphism. *Biotechnology*, v. 17, p. 120-127, 2018. <https://doi.org/10.3923/biotech.2018.120.127>.
- Lamm, F. R., Camp, R. C. Subsurface drip irrigation. *Developments in Agricultural Engineering*, v. 13, p. 473-551, 2007. [https://doi.org/10.1016/S0167-4137\(07\)80016-3](https://doi.org/10.1016/S0167-4137(07)80016-3).
- Lisson, S. N., Inman-Bamber, N. G., Robertson, M. J., Keating, B. A. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research*, v. 92, n. 4, p. 321-335, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.010>.
- Machado, R. S., Ribeiro, R. V., Marchiori, P. E. R., Machado, D. F. S. P., Machado, E. C., Landell, M. G. A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200003>.
- Maia Júnior, S. O. Tolerância de cultivares de cana-de-açúcar ao déficit hídrico: relações hídricas, trocas gasosas, fluorescência da clorofila e metabolismo antioxidante. 2017. 168 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo - AL, 2017.
- Maia Júnior, S. O., Silva, J. A. C., Santos, K. P. O., Cordeiro, D. R. C., 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, n. 3, p. 2661-2672, 2018. <https://doi.org/10.7127/rbai.v12n300830>.

- Mahesh, R., Raja, N. A., Archana, H. A. Performance of surface and subsurface drip fertigation on yield and water use efficiency of sugarcane. 2nd World Irrigation Forum, v. 6, p. 1-10, 2016.
- Malavolta, E. Manual de Nutrição Mineral de Plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- Malavolta, E., Vitti, G. C., Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- Mansour, E., Abdul-Hamid, M. I., Yasin, M. T., Qabil, N., Attia, A. Identifying drought-tolerant genotypes of barley and their responses to various irrigation levels in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, v. 194, p. 58-67, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.021>.
- Marcos, F. C. C., Silveira, N. M., Mokochinski, J. B., Sawaya, A. C. H. F., Marchiori, P. E. R., 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., Inman-Bamber, G., Silva, T. G. F., Vianna, M. S., Nassif, D. S. P., Carvalho, K. S. Sugarcane evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 140, n. 4, p. 1349-1357, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03161-z>
- Marin, F. R., Martha Júnior. G. B., Cassman, K. G., Grassini, P. Prospects for increasing sugarcane and bioethanol production on existing crop area in Brazil. *BioScience*, v. 66, n. 4, p. 307-316, 2016. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw009>.
- Marques, P. A. A., Frizzone, J. A., Teixeira, M. B. O estado da arte da disseminação coletiva da informação (SDI). *Colloquium Agrarian*, v.2, p.17-31, 2006.
- Marschner, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3 Ed. New York, Academic Press, 2012, 651p.
- Matsuoka, S., Garcia, A. A. F., Arizono, H. Melhoramento da cana-de-açúcar. In: Borém, A. 1 Ed. Melhoramento de espécies cultivadas. Viçosa: UFV, 2005. Cap. 3, p. 205-251.
- Melo, L. L., Melo, V. G. M. L., Marques, P. A. A., Frizzone, J. A., Coelho, R. D., Romero, R. A. F., Barros, T. H. S. Deep learning for identification of water deficits in sugarcane based on thermal images. *Agricultural Water Management*, v. 272, p. 107820, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107820>

- Menezes, S. M., Silva, G. F., Silva, M. M., Morais, J. E. F., Santos Júnior, J. A., Menezes, D., Rolim, M. M. Continuous and pulse fertigation on dry matter production and nutrient accumulation in coriander. *DYNA*, v. 87, p.18-25, 2020. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.78569>.
- Miranda, A. A. História da cana-de-açúcar. Ed. Komedi. Campinas, São Paulo, 2008. 168p.
- 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, n. 5, p. 1228-1236, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.02.007>.
- Monteiro, J. G., Cruz, F. J. R., Nardin, M. B., Santos, D. M. M. Crescimento e conteúdo de prolina em plântulas de guandu submetidas a estresse osmótico e à putrescina exógena. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, p. 18-25, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000100003>.
- Moraes, M. A. F. D., Bacchi, M. R. P., Caldarelli, C. E. Accelerated growth of the sugarcane, sugar, and ethanol sectors in Brazil (2000 e 2008): Effects on municipal gross domestic product per capita in the south-central region. *Biomass and Bioenergy*, v. 91, p. 116-125, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.05.004>.
- Mozambani, A. E., Pinto, A. S., Segato, S. V., Mattiuz, C. F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: Segato, S. V., Pinto, A. S., Jendiroba, E., Nóbrega, J. C. M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: Editora Printend, 2006. Cap. 4, p. 11-18.
- Novais, R. F., Barros, N. F., Neves, J. C. L. Nutrição Mineral do Eucalipto. In: Barros, N. F., Novais, R. F. 1 Ed. Relação solo eucalipto. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. Cap. 2, p. 25-91.
- OCDE-FAO. Agricultural Outlook 2019-2028, Chapter 5: Sugar (p. 1-326). Paris: OECD-FAO, 2019.
- Oliveira, A. R., Braga, M. B., Santos, B. L. S., Walker, A. M. Análise biométrica de cultivares de cana-de-açúcar cultivadas sob estresse hídrico no vale do Submédio São Francisco. *Energia na Agricultura*, v. 31, p. 48, 2016. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2016v31n1p48-58>.
- Oliveira, E. C. A., Freire, F. J., Oliveira, R. I., Freire, M. B. G., Simões Neto, D. E., Silva, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1343-1352, 2010a. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031>.

- Oliveira, E. C. A., Freire, F. J., Oliveira, R. I., Oliveira, A. C., Freire, M. B. G. S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 3, p. 579-788, 2010b. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000300002>.
- Orlando Filho, J., Rosseto, R., Casagrande, A. A. Cana-De-Açúcar. In: Ferreira, M. E. 1 Ed. *Micronutriente e elementos tóxicos na agricultura*. Jaboticabal: POTAFOS, 2001. Cap. 2, p. 355-373.
- Perin, V., Sentelhas, P. C., Dias, H. B., Santos, E. A. Sugarcane irrigation potential in Northwestern São Paulo, Brazil, by integrating Agrometeorological and GIS tools. *Agricultural Water Management*, v. 220, p. 50-58, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.012>
- Phogat, V., Skewes, M. A., Mahadevan, M., Cox, J. W. Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. *Agricultural Water Management*, v. 118, p. 1-11, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.015>.
- Pires, W. M., Teixeira, M. B., Soares, F. A. L., Ribeiro, W. A., Lopes Filho, L. C. Cultivo da cana-de-açúcar sob diferentes níveis de reposição hídrica, com e sem adição de nitrogênio. *Científica - Multidisciplinary Journal*, v. 3, p. 56-87, 2018. <https://doi.org/10.29247/2358-260X.2018v5i3.p56-87>.
- Pires, R. C. M., Barbosa, E. A. A., Arruda, F. B., Sakai, E., Silva, T. J. A. Effects of Subsurface Drip Irrigation and Different Planting Arrangements on the Yields and Technological Quality of Sugarcane. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 140, p. 1-7, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000710](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000710)
- Puértolas, J., Albacete, A., Dodd, I. C. Irrigation frequency transiently alters whole plant gas exchange, water and hormone status, but irrigation volume determines cumulative growth in two herbaceous crops. *Environmental and Experimental Botany*, v. 176, p. 104-110, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104101>.
- Rank, P. H., Vishnu, B. Pulse drip irrigation: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, v. 10, n. 1, p. 125-130, 2021.
- RIDESIA - Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. 45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de RIDESA. 1 Ed. Curitiba: Graciosa, 2015. 156p.

- Salviano, A. M., Moura, M. S. B., Silva, T. G. F., Carmo, J. F. A., Brandão, E. O. Acúmulo e exportação de macronutrientes pela cana de açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Científica Intelletto*, v. 2, n. 2, p. 16-27, 2017.
- Sampaio, E. V. S. B., Salcedo, I. H., Silva, V. M., Alves, G. D. Capacidade de suprimento de nitrogênio e resposta à fertilização de vinte solos de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 19, n. 3, p. 269-279, 1995.
- Santos, L. C., Coelho, R. D., Barbosa, F. S., Leal, D. P. V., Fraga Júnior, E. F., Barros, T. H. S., Lizcano, J. V., Ribeiro, N. L. Influence of deficit irrigation on accumulation and partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties. *Agricultural Water Management*, v. 221, p. 322-333, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.013>.
- Santos, F. C., Coelho, A. M., Resende, A. V., Miranda, R. A. Correção do solo e adubação na cultura do sorgo. *Informe Agropecuário*, v. 35, p. 76-88, 2014.
- Saraiva, G. F. R., Andrade, R. S., Souza, G. M. Termografia por infravermelho como ferramenta de diagnóstico precoce de estresse hídrico severo em soja. *Biosfera*, v. 1, n. 2, p. 158-169, 2014.
- Scarpate, F. V., Hernandez, T. A. D., Corrêa, S. T. R., Kolln, O. T., Gava, G. J. D. C., Santos, L. N. S., Victoria, R. L. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 4576-4584, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.107>.
- Scarpate, M. S., Beauclair, E. G. F. Anatomia e botânica. In: Miranda, D.L. L.; Vasconcellos, A. C. M., Landell, M. G. A. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônômico IAC, 2008. Cap. 4, p. 47-56.
- Segal, E., Ben-Gal, A., Shani, U. Root water uptake efficiency under ultra-high irrigation frequency. *Plant and Soil*, v. 282, p. 333-341, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-0003-6>.
- Segato, S. V., Mattiuz, C. F. M., Mozambani, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: Segato, S. V., Pinto, A. S., Jendiroba, E., Nóbrega, J. C. M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: Livro Ceres, 2006. Cap. 3, p. 19-36.
- Silber, A., Israeli, Y., Levi, M., Keinan, A., Shapira, O., Chudi, G., Golan, A., Noy, M., Levkovitch, I., Assouline, S. Response of “Hass” avocado trees to irrigation management and root constraint. *Agricultural Water Management*, v. 104, p. 95-103, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.003>.

- Silber, A., Bruner, M., Kenig, E., Reshef, G., Zohar, H., Posalski, I., Yehezkel, H., Shmuel, D., Cohen, S., Dinar, M., Matan, E., Dinkin, I., Cohen, Y., Karni, L., Aloni, B., Assouline, S. High fertigation frequency and phosphorus level: Effects on summer-grown bell pepper growth and blossom-end rot incidence. *Plant and Soil*, v. 270, p. 135-146, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-1311-3>.
- Silber, A., Xu, G., Wallach, R. High irrigation frequency: the effect on plant growth and on uptake of water and nutrients. *Acta Horticulturae*, v. 627, p. 89-96, 2003. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.627.10>.
- Silva, A. C. C., Almeida, W. F., Lima, L. A., Oliveira, M. C., Guimarães, A. L. Water use efficiency of different production techniques for zucchini. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 41, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v41i1.42604>.
- Silva, K. I., Sales, C. R. G., Marchioria, P. E. H., Silveira, N. M., Machado, E. C., Ribeiro, R. V. Short-term physiological changes in roots and leaves of sugarcane varieties exposed to H₂O₂ in root medium. *Journal of Plant Physiology*, v. 177, p. 93-99, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.01.009>.
- Silva, T. G. F., Moura, M. S. B., Zolnier, S., Carmo, J. F. A., Souza, L. S. B. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. *Revista Ciência Agronômica*, v. 43, n. 3, p. 500-509, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000300012>.
- Sinclair, T. R., Gilbert, R. A., Perdomo, R. E., Shine Jr., J. M., Powell, G., Montes, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. *Field Crops Research*, v. 88, n. 5, p. 171-178, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.12.005>.
- Singh, I., Verma, R. R., Srivastava, T. K. Growth, Yield, Irrigation Water Use Efficiency, Juice Quality and Economics of Sugarcane in Pusa Hydrogel Application Under Different Irrigation Scheduling. *Sugar Tech*, v. 20, n. 1, p. 29-35, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0515-9>.
- Sousa, L. M., Campos, P. F., Alves Júnior, J., Casaroli, D., Evangelista, A. W. P. Produtividade de diferentes variedades de cana-de-açúcar submetidas à condição de déficit hídrico. *Global Science Technology*, v. 10, n. 3, p. 84-94, 2017.
- Souza, C. F., Bizari, D. R. Soil solution distribution in subsurface drip irrigation in sugarcane. *Engenharia Agrícola*, v. 38, n. 2, p. 217-224, 2018. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n2p217-224/2018>.

- Stallmann, J., Schweiger, R., Pons, C. A. A., Müller, C. Wheat growth, applied water use efficiency and flag leaf metabolome under continuous and pulsed deficit irrigation. *Scientific Reports*, v. 10, p. 101-1012, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66812-1>.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., Murphy, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6 Ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017. 888p.
- Tarumoto, M. B., Arana, A. R. A., Ferreira, T. E., Silva, M. A. Impactos positivos da cultura da cana-de-açúcar no Brasil. *Journal of Agronomic Sciences*, v.4, p.526-545, 2015.
- UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Balanço de atividades 2012/2013 a 2018/2019: setor sucroenergético. Disponível em: <<https://www.unica.com.br/wpcontent/uploads/2019/06/Relatorio-Atividades-201213-a-201819.pdf>>. Acesso em 4 de dezembro de 2020.
- UNICA - União da agroindústria canavieira do Estado de São Paulo. UNICADATA. 2016. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/>>. Acesso em 7 de outubro de 2020.
- 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, n. 11, p. 582-592, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.032>.
- Verma, K. K., Singh, P., Song, X. P., Malviya, M. K., Singh, R. K., Chen, G. L., Solomon, S., Li, Y. R. Mitigating Climate Change for Sugarcane Improvement: Role of Silicon in Alleviating Abiotic Stresses. *Sugar Tech*, v. 22, n. 5, p. 741-749, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00831-0>
- Vieira, G. H. S., Mantovani, E. C., Sediyaama, G. C., Delazari, F. T. Indicadores morfofisiológicos do estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. *Bioscience Journal*, v. 30, n. 1, p. 65-75, 2014.
- Wanderley, L. R. S., Oliveira, E. C. A., Freire, F. J., Simões Neto, D. E., Santos, R. L. Nutritional Requirement by Irrigated Brazilian Sugarcane Varieties. *Sugar Tech*, v. 23, n. 4, p. 762-775, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00921-z>.
- Yan, S., Wu, Y., Fan, J., Zhang, F., Qiang, S., Zheng, J., Xiang, Y., Guo, J., Zou, H. Effects of water and fertilizer management on grain filling characteristics, grain weight and productivity of drip-fertigated winter wheat. *Agricultural Water Management*, v. 213, p. 983-995, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.019>.

- Yao, J., Qi, Y., Li, H., Shen, Y. Water saving potential and mechanisms of subsurface drip irrigation: A review. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, v. 29, p. 1076-1084, 2021. <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200980>.
- Yao, W. W., Ma, X. Y., Li, J., Parkes, M. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, v. 29, p. 331-339, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0236-2>.
- YARABRASIL. 2016. Princípios Agronômicos da Cana-de-Açúcar. Disponível em: <<https://www.yarabrasil.com.br/nutricao-de-plantas/cana-de-acucar/principios-agronomicos-da-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 13 fev. 2019.
- Zamora, V. R. O., Silva, M. M., Santos Júnior, J. A., Silva, G. F., Menezes, D., Almeida, C. D. G. C. Assessing the productivity of coriander under different irrigation depths and fertilizers applied with continuous and pulsed drip systems. *Water Supply*, v. 21, n. 5, p. 2099-2108, 2021. doi:10.2166/ws.2021.008.
- Zamora, V. R. O., Silva, M. M., Silva, G. F., Santos Júnior, J. A., Menezes, D., Menezes, S. M. Pulse drip irrigation and fertigation water depths in the water relations of coriander. *Horticultura Brasileira*, v. 37, n. 1, p. 22-28, 2019. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620190103>.
- Zhou, S., Williams, A. P., Lintner, B. R., Berg, A. M., Zhang, Y., Keenan, T. F., Cook, B. I., Hagemann, S., Seneviratne, S. I., Gentile, P. Soil moisture-atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands. *Nature Climate Change*, v. 11, n. 1, p. 38-44, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00945-z>.
- Zivcak, M., Brestic, M., Balatova, Z., Drevenakova, P., Olsovska, K., Kalaji, H. M., Yang, X., Allakhverdiev, S. I. Photosynthetic electron transport and specific photoprotective responses in wheat leaves under drought stress. *Photosynthesis Research*, v. 117, n. 3, p. 529-546, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9885-3>.

CAPÍTULO II

**BIOMASSA VEGETAL, EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES EM
CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO
PULSADO E CONTÍNUO**

BIOMASSA VEGETAL, EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES EM CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO

RESUMO: Atender a real necessidade hídrica e nutricional da cana-de-açúcar é primordial para a sustentabilidade e a rentabilidade dos canaviais irrigados, sendo necessário o desenvolvimento de tecnologias que visem subsidiar de forma eficiente a produção agrícola. Desse modo, objetivou-se analisar a produção de biomassa vegetal seca, a extração e exportação de nutrientes na cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua. Realizou-se um experimento de campo na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), no período de dezembro de 2020 a dezembro de 2021. O experimento foi conduzido em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 5, com quatro repetições, sendo dois tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) e cinco lâminas de irrigação (40, 60, 80, 100 e 120% da evapotranspiração da cultura - ETc). A redução da lâmina de irrigação diminuiu a produção de biomassa seca, a extração e a exportação de nutrientes na cana-de-açúcar cultivar RB041443. A irrigação pulsada possibilitou maior produção de biomassa seca dos colmos e da parte aérea e, conseqüentemente, promoveu maior extração e exportação de nutrientes pela cultura. A cultura apresentou a seguinte ordem decrescente de extração e exportação de nutrientes: K > Ca > N > Mg > P > S > Fe > Mn > Zn > Cu.

PALAVRAS-CHAVE: *Saccharum* spp., nutrição mineral, manejo de irrigação, cultivar BR041443

PLANT BIOMASS, NUTRIENT EXTRACTION AND EXPORT IN SUGARCANE UNDER PULSED AND CONTINUOUS DRIP IRRIGATION BLADE

ABSTRACT: Meeting the real water and nutritional needs of sugarcane is essential for the sustainability and profitability of irrigated cane fields, requiring the development of technologies that aim to efficiently subsidize agricultural production. Thus, the objective was

to analyze the production of dry plant biomass, the extraction and export of nutrients in sugarcane under pulsed and continuous irrigation. A field experiment was carried out at the Estação Experimental do Carpina (EECAC/UFRPE), from December 2020 to December 2021. The experiment was carried out in randomized blocks in a 2 x 5 factorial scheme, with four replications, with two types of irrigation application (pulsed and continuous) and five irrigation depths (40, 60, 80, 100 and 120% of the crop evapotranspiration - ET_c). The reduction of the irrigation depth reduced the production of dry biomass, the extraction and the export of nutrients in the sugarcane cultivar RB041443. Pulsed irrigation enabled greater production of dry biomass from the stems and shoots and promoted greater extraction and export of nutrients by the crop. The culture showed the following decreasing order of nutrient extraction and export: K > Ca > N > Mg > P > S > Fe > Mn > Zn > Cu.

KEY WORDS: *Saccharum* spp., mineral nutrition, irrigation management, cultivate BR041443.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) representa uma das principais commodities agrícolas a nível mundial. Seu alto potencial econômico, associado, principalmente, a produção de açúcar e etanol, faz com que a cultura apresente grande importância social na geração de emprego e renda em toda a cadeia produtiva (Pessoa et al., 2021). Atualmente, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar e biocombustível do mundo, com uma área de 8,3 milhões de hectares ocupada pela cultura, produzindo cerca de 568 milhões de toneladas de cana (CONAB, 2022).

Na busca pelo aumento da produtividade e da qualidade dos canaviais, o uso da irrigação faz-se necessário para atender as necessidades hídricas da cultura e alcançar ganhos de produção. De acordo com Alves et al. (2022), a irrigação é uma prática essencial para sustentar a produção agrícola, pois contribui para a seguridade da produção e garante a estabilidade socioeconômica dos sistemas de cultivos. No entanto, diante da instabilidade climática e da escassez dos recursos hídricos, é primordial a racionalização de água e insumos nos sistemas de cultivos irrigados.

A água utilizada para fins de irrigação deve ser gerida adequadamente de modo a garantir a sustentabilidade dos cultivos bem como reduzir os gastos de produção. Em condições de escassez hídrica, o uso eficiente da água de irrigação é essencial para potencializar os benefícios da irrigação e contribuir para desenvolvimento agrícola sustentável (Krishnaprabu, 2018). Para isso, a implantação de novas tecnologias e o aprimoramento de técnicas e ferramentas utilizadas dentro do manejo de irrigação tornam-se fundamentais e necessárias para suprir as necessidades hídricas das culturas e mitigar os efeitos deletérios do estresse hídrico.

A esse respeito, tem-se a irrigação por pulsos, uma técnica empregada dentro do manejo de irrigação que consiste no fracionamento da lâmina diária aplicada em por meio curtos eventos de irrigação seguidos por um período de repouso do sistema, constituindo ciclos de liga/desliga. Estudos demonstram que a irrigação pulsada pode aumentar a eficiência do uso da água (Eid et al., 2013; Almeida et al., 2018; Zamora et al., 2021), melhorar eficiência de absorção de nutrientes (Assouline et al., 2006; Silber et al., 2012; Menezes et al., 2020) e proporcionar maior crescimento e produtividade (Cormier et al., 2020) em algumas culturas de interesse agrícola.

A potencialidade da irrigação por pulsos em contribuir para o cultivo irrigado da cana-de-açúcar, bem como sua aplicação para um manejo hídrico e nutricional de forma racional e eficiente, associado a condições de estresse hídrico é incipiente na literatura. Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho analisar a produção de biomassa vegetal, extração e exportação de nutrientes na cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de campo na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) localizada em Carpina, (07°51'24" S, 35°14'16" W, a 180 m de altitude), região da Zona da Mata do Estado de Pernambuco, Brasil. No período de dezembro de 2020 a dezembro de 2021.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como As Megatérmico Tropical (tropical úmido) (Alvares et al., 2014). A precipitação média anual dos últimos 52 anos é de 1.149 mm, sendo que a maior concentração ocorre entre o outono e o inverno, apresentando uma média mensal de 199,6 mm no mês mais chuvoso (junho). Foi

realizada a caracterização química e física do solo da área experimental nas camadas de 0-0,20 e de 0,20-0,40 m (Tabela 1). O solo da área experimental é classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrófico abrupto (EMBRAPA, 2013).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental, e caracterização química da água utilizada para irrigação, Carpina 2022

| Camada | Características Químicas do Solo | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------------|---------------------|---|------------------|-----------------|----------------|------------------|----------------------------------|-------------|------|--------------------|-------|------|
| | pH | P | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Na ⁺ | K ⁺ | Al ⁺³ | H ⁺ +Al ⁺³ | SB | CTC | m | V | M.O. |
| m | H ₂ O | mg dm ⁻³ | -----cmol _c dm ⁻³ ----- | | | | | | -----%----- | | g kg ⁻¹ | | |
| 0 - 0,20 | 5,8 | 12,0 | 5,16 | 1,05 | 0,06 | 0,12 | 0,0 | 2,8 | 6,39 | 9,19 | 0,0 | 69,53 | 19,8 |
| 0,20 - 0,40 | 5,9 | 12,0 | 2,31 | 0,93 | 0,04 | 0,07 | 0,0 | 3,0 | 3,35 | 6,35 | 0,0 | 52,76 | 18,8 |

| Camada | Características Físicas do Solo | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|-------|--------|----------------|-------------------------------|------|---|------------------|
| | Areia | Silte | Argila | Textura | Ds | Dp | θ _{CC} | θ _{PMP} |
| m | -----%----- | | | - | -----g cm ⁻³ ----- | | -----m ³ m ⁻³ ----- | |
| 0 - 0,20 | 70,9 | 12,0 | 17,1 | Franco arenoso | 1,36 | 2,63 | 0,15 | 0,10 |
| 0,20 - 0,40 | 71,0 | 9,9 | 19,1 | Franco arenoso | 1,31 | 2,56 | 0,18 | 0,12 |

| Características Químicas da Água de Irrigação | | | | | | | | | | |
|---|--------------------|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------|--------------|--|------|----------------------------|
| pH | CE | K ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Na ⁺ | Sulfatos | Alcalinidade | Cloretos | RAS | Classificação ¹ |
| - | dS m ⁻¹ | -----mg L ⁻¹ ----- | | | | ----- | | (mmol L ⁻¹) ^{0,5} | | - |
| 6,5 | 0,2275 | 14,0 | 16,03 | 12,64 | 60,0 | 24,82 | 140,0 | 96,11 | 2,71 | C2S1 |

SB: Soma de Bases; CTC: Capacidade de Troca de Cátions; m: Saturação por alumínio; V: Saturação por Bases; M.O: Matéria Orgânica; Ds: Densidade do Solo; Dp: Densidade de Partículas; θ: Umidade Volumétrica; CE: Condutividade Elétrica; RAS: Relação de Adsorção de Sódio; ¹ - Classificação da água para fins de irrigação de acordo com Richards (1954).

O experimento foi realizado durante o ciclo correspondente a primeira soca (segunda folha). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com 10 tratamentos distribuídos em esquema fatorial 2 x 5, sendo o primeiro fator o tipo de aplicação da irrigação (irrigação por pulsos e irrigação contínua) e o segundo fator cinco lâminas de reposição da evapotranspiração da cultura (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc), com quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais.

Para o tratamento correspondente a irrigação pulsada utilizou-se quatro pulsos de irrigação com intervalo de 40 minutos de repouso entre duas irrigações. A duração de cada pulso, para os tratamentos pulsados, foi definida após o cálculo diário da lâmina de irrigação necessária pela cultura.

Cada parcela experimental foi constituída por quatro sulcos de 7 m de comprimento, espaçados por 1,4 m entre sulcos e combinados em fileira dupla de plantas, com 0,6 m entre linha de plantas (Figura 1). Este arranjo resultou em 56 m² por unidade experimental, no qual os dois sulcos combinados do centro de cada parcela (20 m², desconsiderando 1 m das extremidades) foram considerados como área útil para realização das análises. A cultivar de

cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a RB041443 desenvolvida pelo Programa de Melhoramento Genético de Cana de Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, integrante da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucreenergético (RIDESA) (Oliveira et al, 2021).

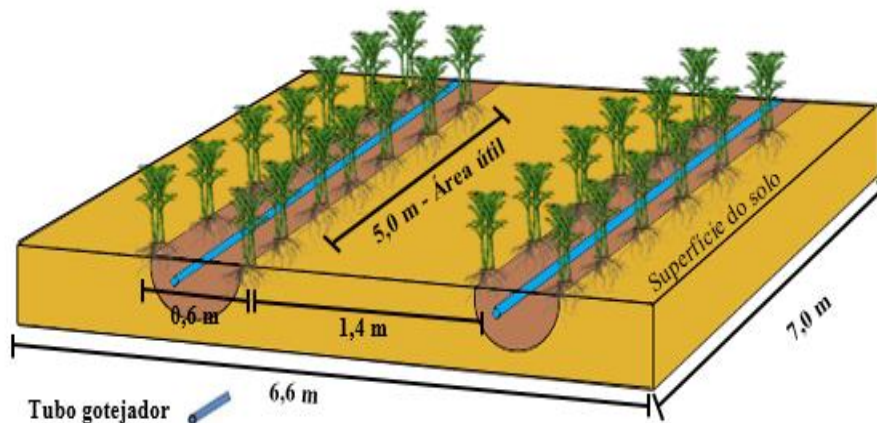


Figura 1. Esquema da distribuição das linhas de plantas e do sistema de gotejamento subsuperficial nas unidades experimentais.

O plantio da área foi realizado em dezembro de 2019, com material vegetal proveniente da própria EECAC. O ciclo correspondente a cana planta (2020) iniciou com a realização do preparo e correção do solo. O manejo nutricional na cana-de-açúcar, no primeiro ciclo (cana planta) foi realizado com uma aplicação de calcário dolomítico para correção da acidez do solo, aplicando-se $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, com o objetivo de elevar o pH e neutralizar o alumínio trocável. Na cana planta a adubação foi baseada na análise química do solo considerando a demanda nutricional da cultura de acordo com recomendação preconizada por Cavalcanti et al. (2008).

O ciclo correspondente a primeira soca, considerado para fins de análises, iniciou com o corte da cana planta em dezembro de 2020. O manejo nutricional da cana soca considerou a recomendação preconizada por Aguiar et al. (2014) para a adubação nitrogenada, no qual aplicou-se de forma convencional 100 kg ha^{-1} aos 55 dias após o corte (DAC) utilizando como fonte o sulfato de amônia, e 50 kg ha^{-1} aplicada via fertirrigação utilizando como fonte a ureia.

O fósforo e o potássio foram aplicados de acordo com recomendação preconizada por Ribeiro et al. (1999), nas doses de 40 e 140 kg ha^{-1} , respectivamente, cujo o fósforo foi aplicado todo de maneira convencional aos 55 DAC, utilizando como fonte o superfosfato triplo, e o potássio foi aplicado 80 kg ha^{-1} de forma convencional também aos 55 DAC, utilizando como fonte o cloreto de potássio, e 60 kg ha^{-1} aplicado via água de irrigação, como fonte foi utilizado o cloreto de potássio branco.

Os fertilizantes aplicados via água de irrigação, foram disponibilizados entre os meses de abril a agosto de 2021, sendo realizada uma aplicação por semana. O total aplicado nos meses de abril, maio, junho, julho e agosto foram de 20, 10, 10, 5 e 5 kg ha⁻¹ para o nitrogênio e 20, 10, 10, 10 e 10 kg ha⁻¹ para o potássio. A cada evento de fertirrigação aplicou-se apenas a lâmina de irrigação correspondente a 100% da ET_c de forma contínua para todas as parcelas experimentais, garantindo que todo o estande de plantas tivesse as mesmas condições de nutrição.

Foi realizado um suprimento nutricional com o fertilizante mineral misto do fabricante BIOGROW de nome comercial BIOSTIM COMPLEX com garantias de magnésio (23,1 g L⁻¹), boro (2,8 g L⁻¹), cobre (2,5 g L⁻¹), ferro (25 g L⁻¹), manganês (21,8 g L⁻¹), molibdênio (0,5 g L⁻¹) e zinco (21,8 g L⁻¹). A recomendação do produto para cana-de-açúcar, segundo o fabricante é de 2 a 3 L ha⁻¹. Realizou-se duas aplicações do produto, a primeira realizada aos 110 DAC aplicada via foliar na dose de 2,5 L ha⁻¹, e a segunda foi realizada via fertirrigação aos 230 DAC na dose de 2 L ha⁻¹.

O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento subsuperficial composto por fitas gotejadoras (DN 16 mm) com emissores do tipo *in line* autocompensantes e antidrenantes, espaçados a 0,50 m e saída cilíndrica (tipo PC/AS, vazão de 1 L/h), alocadas no solo a uma profundidade de 0,20 m. O sistema era composto ainda por uma eletrobomba centrífuga de eixo horizontal (3,5 CV), um sistema de filtragem e retro lavagem com dois filtros de areia, um sistema de injeção da fertirrigação composto por um manômetro glicerinado, bico injetor venturi (1,2") e um filtro de tela (cesta 1" de 200 mesh), e um conjunto de 10 registros de esfera para o controle do fluxo de água para cada tratamento de forma individual.

O tempo de irrigação para cada tratamento foi determinado diariamente, levando em consideração a lâmina bruta de irrigação (LB), obtida pela relação entre a ET_c e a eficiência de aplicação (94%) do sistema de irrigação, obtida por meio de um teste de uniformidade de distribuição de água (Keller e Karmelli, 1974). O parcelamento da lâmina de irrigação foi realizado de forma manual, de acordo com o tempo de duração de cada tratamento definido antes do início da irrigação.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi estimada diariamente com base na metodologia do Tanque Classe "A", proposta por Doorenbos e Pruitt (1977), calculada pela seguinte equação:

$$ET_c = ECA \times K_p \times K_c \times K_l \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

ETc = Evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹;

ECA = Evaporação do tanque classe A, mm dia⁻¹;

Kp = Coeficiente do tanque classe A, adimensional;

Kc = Coeficiente de cultivo, adimensional, e,

Kl = Coeficiente de localização do sistema de irrigação por gotejamento, adimensional.

Os valores de Kp foram obtidos considerando dados de velocidade do vento, umidade relativa do ar e as condições de instalação do tanque classe A, que apresentava vegetação rasteira contendo bordadura de 10 m, conforme metodologia proposta por Doorenbos e Pruitt (1977). Os valores de Kc adotados no experimento segue a recomendação de Doorenbos e Kassam (1994) para cada estágio fenológico da cana-de-açúcar (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura

| Estádios de desenvolvimento | |
|-----------------------------|------|
| Dias | Kc |
| 1 – 61 | 0,40 |
| 62 – 153 | 0,75 |
| 154 – 244 | 1,10 |
| 245 – 334 | 1,25 |
| 335 – 360 | 0,70 |

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

A aplicação dos tratamentos teve início aos 60 DAC, visando assegurar a rebrota e a estabilização do estande de plantas. Nesse período foram realizadas duas irrigações de 21 mm cada, aos 15 e 40 DAC. A lâmina de água recebida via precipitação pluviométrica foi considerada e subtraída no cálculo de cada evento de irrigação.

Ao longo do período experimental foram monitorados a variação dos valores de precipitação pluvial (P), evapotranspiração de referência (ETo), ETc e a lâmina bruta (LB) aplicada nos tratamentos correspondentes a 40, 60, 80, 100 e 120% da ETc (Figura 2).

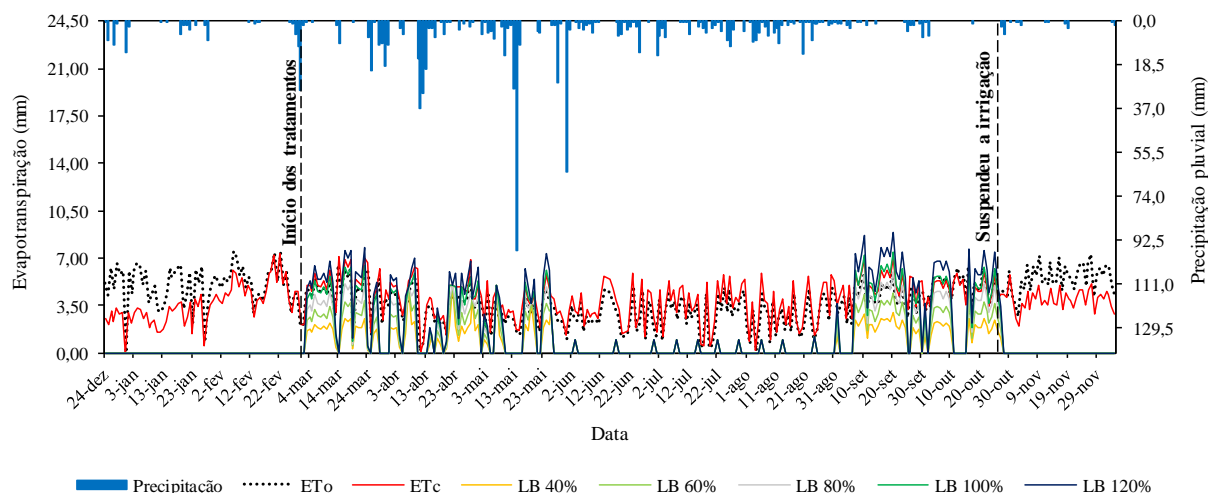


Figura 2. Valores de precipitação, evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração da cultura (ETc), e lâmina bruta aplicada nos tratamentos de 40% (LB 40%), 60% (LB 60%), 80% (LB 80%), 100% (LB 100%) e 120% (LB 120%) da ETc na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2021.

O acumulado de chuva durante o ciclo da cana soca foi de 895 mm ano^{-1} , no qual os maiores índices pluviométricos foram nos meses de março a agosto, somando 764 mm, correspondente a 85,4% do acumulado para todo o ciclo, sendo o mês de maio o mais chuvoso, com acumulado de 282 mm. A ETo acumulada ao longo do ciclo da cultura foi de 1.398 mm, com média de $4,03 \text{ mm dia}^{-1}$, já a ETc acumulada foi de $1.363 \text{ mm ano}^{-1}$, com valor médio de $3,93 \text{ mm dia}^{-1}$. As lâminas de irrigação aplicadas de forma pulsada e contínua durante o ciclo da cana soca nos tratamentos correspondente a 40, 60, 80, 100 e 120% da ETc, foram de 204, 306, 408, 510 e 612 mm, respectivamente.

Aos 310 DAC foi interrompida a irrigação promovendo um estresse hídrico na cultura, com o propósito de intensificar o acúmulo de açúcares até o momento da colheita e induzir a maturação e a concentração do açúcar. Segundo Doorenbos e Kassam (1994), durante o período de maturação a cana-de-açúcar necessita de baixo teor de água no solo. Após esse período, aos 352 DAC realizou-se a colheita da cana-de-açúcar.

Foram coletadas 10 plantas de forma aleatória, na área útil de cada parcela experimental (20 m^2 centrais da parcela), as quais foram divididas em colmo e parte aérea (folhas + ponteiros). Separadamente, o material foi pesado para a determinação da biomassa verde fresca da parte aérea e dos colmos (Mg ha^{-1}) e em seguida realizou-se a trituração das amostras por meio de uma máquina forrageira para a homogeneização do material.

A partir do material moído de cada parcela, retirou-se uma subamostra representativa, que foi pesada e acondicionada em sacos de papel e colocadas em estufa de circulação forçada

de ar (65 °C) até obtenção do peso seco constante de massa vegetal. Por meio do peso seco de cada amostra foi realizada a extrapolação para a produção de biomassa seca dos colmos (BSC, Mg ha⁻¹) e biomassa seca da parte aérea (BSPA, Mg ha⁻¹).

Para a determinação da concentração dos nutrientes na cana-de-açúcar, as amostras secas foram processadas em moinho do tipo Willey, com peneira de 2 mm e, posteriormente, foram submetidas ao processo de extração dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e dos micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn). A extração dos nutrientes foi realizada através da digestão da matéria seca por via úmida, em que para o N procedeu-se a digestão sulfúrica com a utilização de um bloco digestor, e para os demais nutrientes (P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn) a digestão nítrica utilizando um digestor por micro-ondas, conforme metodologia preconizada por Silva (2009).

A concentração de N total foi determinada utilizando o método de arraste de vapor (Kjeldahl); K pelo método de fotometria de chamas; P pelo método colorimétrico molibdo-vanadato; S pelo método turbidimétrico do sulfato de bário; e Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, de acordo com os procedimentos metodológicos sugeridos por Bezerra Neto e Barreto (2011).

O acúmulo de nutrientes no colmo e na parte aérea da cana-de-açúcar foi obtido por meio da multiplicação da concentração de cada nutriente pela biomassa seca de cada parte da planta, respectivamente. A extração total de nutrientes foi dada pelo somatório do acúmulo de nutrientes nos colmos e na parte aérea da cana-de-açúcar (kg ha⁻¹). A exportação de nutrientes foi dada pela quantidade de nutrientes acumulados nos colmos da cultura, uma vez que este representa o produto de interesse comercial e dessa forma expressa o consumo efetivo de nutrientes (kg ha⁻¹).

Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade e homocedasticidade, e em seguida analisados mediante análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$). Quando verificado efeito significativo para o fator quantitativo realizou-se a análise de regressão polinomial a 5% de probabilidade. A escolha do modelo de regressão baseou-se no maior valor de coeficiente de determinação (R^2), na significância dos parâmetros da equação de ajuste ($p \leq 0,05$), no efeito não significativo do desvio de regressão e na resposta biológica de cada variável em função dos tratamentos. Para o fator qualitativo foi aplicado o teste de médias de Tukey a 5% de probabilidade. Utilizou-se o software estatístico SISVAR (Ferreira, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da análise de variância (Tabela 3) é possível verificar que a extração e a exportação dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), e dos micronutrientes, ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) e também a produção de biomassa seca (dos colmos e da parte aérea) na cultura da cana-de-açúcar, foram influenciados ($p \leq 0,05$) de forma isolada pelos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) e pelas lâminas de reposição da evapotranspiração da cultura (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc).

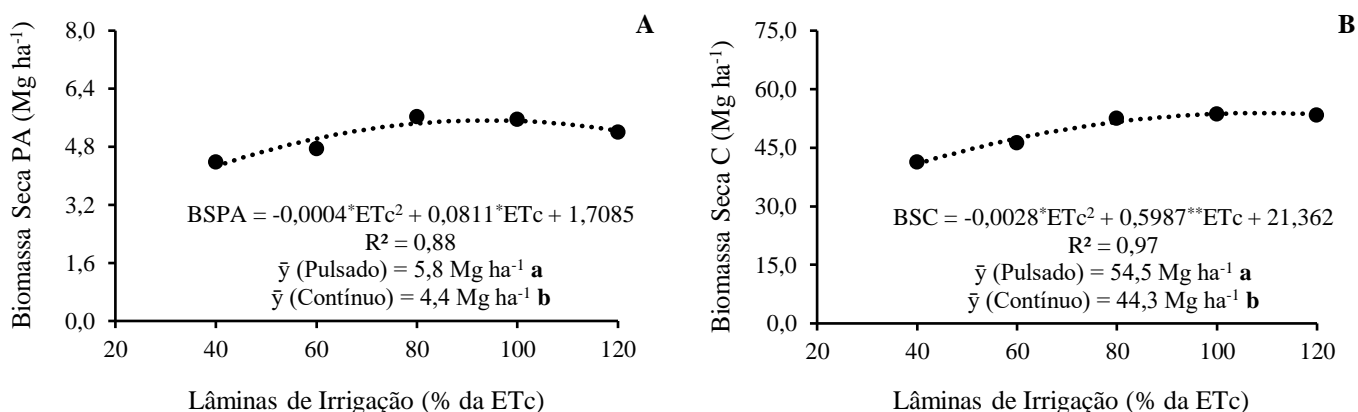
Tabela 3. Resumo da análise de variância para a extração e exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), e para a produção de biomassa seca da parte aérea (BSPA) e dos colmos (BSC) em cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua

| Extração de Nutrientes e Biomassa Seca | | | | | | | |
|--|----|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| FV | GL | Quadrado Médio | | | | | |
| | | Macronutrientes | | | | | |
| | | N | P | K | Ca | Mg | S |
| Tipos de Apli. (T) | 1 | 58396,3** | 5705,4** | 175044,8** | 60574,3** | 9129,8** | 3307,1** |
| Lâminas (L) | 4 | 8505,9** | 542,2** | 31398,6** | 17778,9** | 3011,6** | 621,5** |
| T x L | 4 | 249,2 ^{ns} | 70,0 ^{ns} | 978,8 ^{ns} | 520,5 ^{ns} | 31,5 ^{ns} | 15,0 ^{ns} |
| Blocos | 3 | 2291,9 ^{ns} | 186,9 ^{ns} | 602,5 ^{ns} | 1437,4 ^{ns} | 530,3 ^{ns} | 256,6 ^{ns} |
| Resíduo | 27 | 1714,8 | 107,2 | 5634,9 | 1848,5 | 162,5 | 121,3 |
| CV | % | 20,7 | 22,97 | 21,3 | 18,1 | 12,5 | 26,3 |
| FV | GL | Micronutrientes | | | | Biomassa Seca | |
| | | Fe | Mn | Cu | Zn | BSPA | BSC |
| | | | | | | | |
| Tipos de Apli. (T) | 1 | 60,0** | 29,7** | 0,329** | 1,521** | 22,42* | 1046,0** |
| Lâminas (L) | 4 | 19,1** | 4,0** | 0,076** | 0,258** | 2,26** | 238,0** |
| T x L | 4 | 0,153 ^{ns} | 0,336 ^{ns} | 0,008 ^{ns} | 0,007 ^{ns} | 0,05 ^{ns} | 8,16 ^{ns} |
| Blocos | 3 | 0,765 ^{ns} | 0,425 ^{ns} | 0,009 ^{ns} | 0,006 ^{ns} | 2,76* | 39,83 ^{ns} |
| Resíduo | 27 | 3,6 | 0,915 | 0,011 | 0,012 | 0,72 | 29,02 |
| CV | % | 28,4 | 31,6 | 33,4 | 10,5 | 16,7 | 11,5 |
| Exportação de Nutrientes | | | | | | | |
| FV | GL | Quadrado Médio | | | | | |
| | | Macronutrientes | | | | | |
| | | N | P | K | Ca | Mg | S |
| Tipos de Apli. (T) | 1 | 39076,3** | 4894,1** | 264574,6** | 45661,8** | 6128,6** | 2141,8** |
| Lâminas (L) | 4 | 5021,9* | 441,7** | 48583,4** | 14386,1** | 2365,9** | 471,0** |
| T x L | 4 | 226,9 ^{ns} | 74,8 ^{ns} | 889,5 ^{ns} | 404,0 ^{ns} | 20,8 ^{ns} | 6,2 ^{ns} |
| Blocos | 3 | 2049,2 ^{ns} | 193,8 ^{ns} | 2329,5 ^{ns} | 1302,3 ^{ns} | 440,9 ^{ns} | 235,8 ^{ns} |
| Resíduo | 27 | 1644,5 | 104,1 | 5894,1 | 1798,7 | 143,7 | 115,9 |
| CV | % | 26,3 | 25,5 | 17,4 | 19,8 | 13,9 | 31,7 |
| FV | GL | Micronutrientes | | | | | |
| | | Fe | Mn | Cu | Zn | | |
| | | | | | | | |
| Tipos de Apli. (T) | 1 | 38,2** | 24,4** | 0,258** | 0,924** | | |

| | | | | | |
|-------------|----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Lâminas (L) | 4 | 14,7** | 3,4** | 0,061** | 0,187** |
| T x L | 4 | 0,212 ^{ns} | 0,324 ^{ns} | 0,007 ^{ns} | 0,005 ^{ns} |
| Blocos | 3 | 0,927 ^{ns} | 0,562 ^{ns} | 0,009 ^{ns} | 0,004 ^{ns} |
| Resíduo | 27 | 3,4 | 0,932 | 0,010 | 0,010 |
| CV | % | 32,7 | 36,0 | 36,9 | 11,2 |

^{ns}: não significativo; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

Analisando a produção de biomassa seca pela cultura da cana-de-açúcar, pode-se constatar que a BSPA (Figura 3A) chegou a produzir 5,8 Mg ha⁻¹, na lâmina de irrigação correspondente a 101,4% da ET_c, apresentando um incremento de 35% em relação a produção de 4,3 Mg ha⁻¹, obtida na lâmina de 40% da ET_c, que representa o maior nível de estresse hídrico aplicado. Em relação a produção de BSC (Figura 3B), o máximo produzido pela cultura foi de 53,4 Mg ha⁻¹, obtido na lâmina de 107% da ET_c, em relação a menor lâmina de irrigação avaliada (40% da ET_c), houve um aumento de 31% da BSC. Em ambas variáveis (BSPA e BSC) a irrigação pulsada proporcionou maior produção, com incrementos de 32 e 23%, em relação a irrigação aplicada de forma contínua.



**,* - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey para os tipos de irrigação pulsada e contínua.

Figura 3. Produção de biomassa seca da parte aérea - BSPA (A) e biomassa seca dos colmos - BSC (B) em cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (ET_c) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).

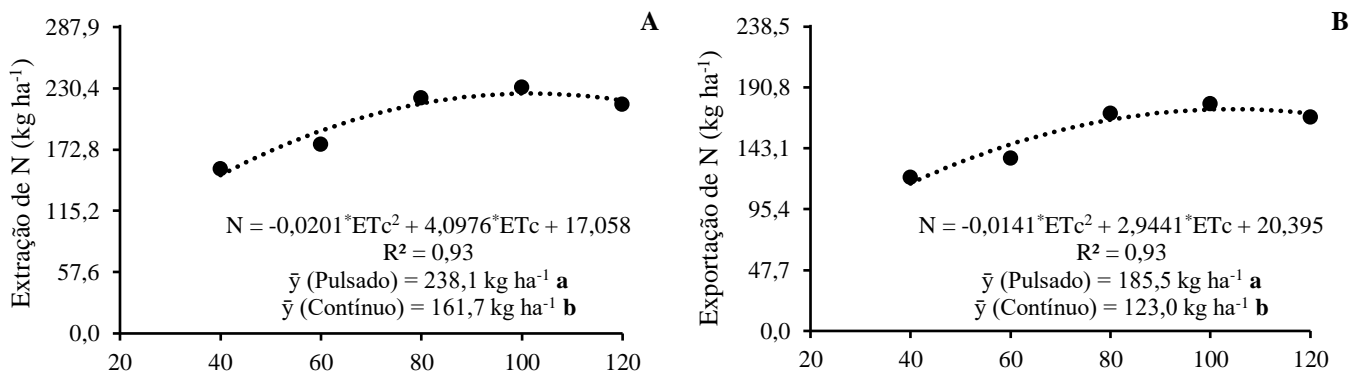
O aumento do estresse hídrico reduziu a produção de biomassa seca na cana-de-açúcar, assim como constatado também em outros estudos com a cultura (Marcos et al., 2018; Misra et al., 2020; Dingre e Gorantiwar, 2021). Essa redução da produção de biomassa seca pode estar relacionada com a redução dos processos fisiológicos devido aos efeitos deletérios do estresse hídrico, o que compromete o processo de crescimento e desenvolvimento da cultura. Sob

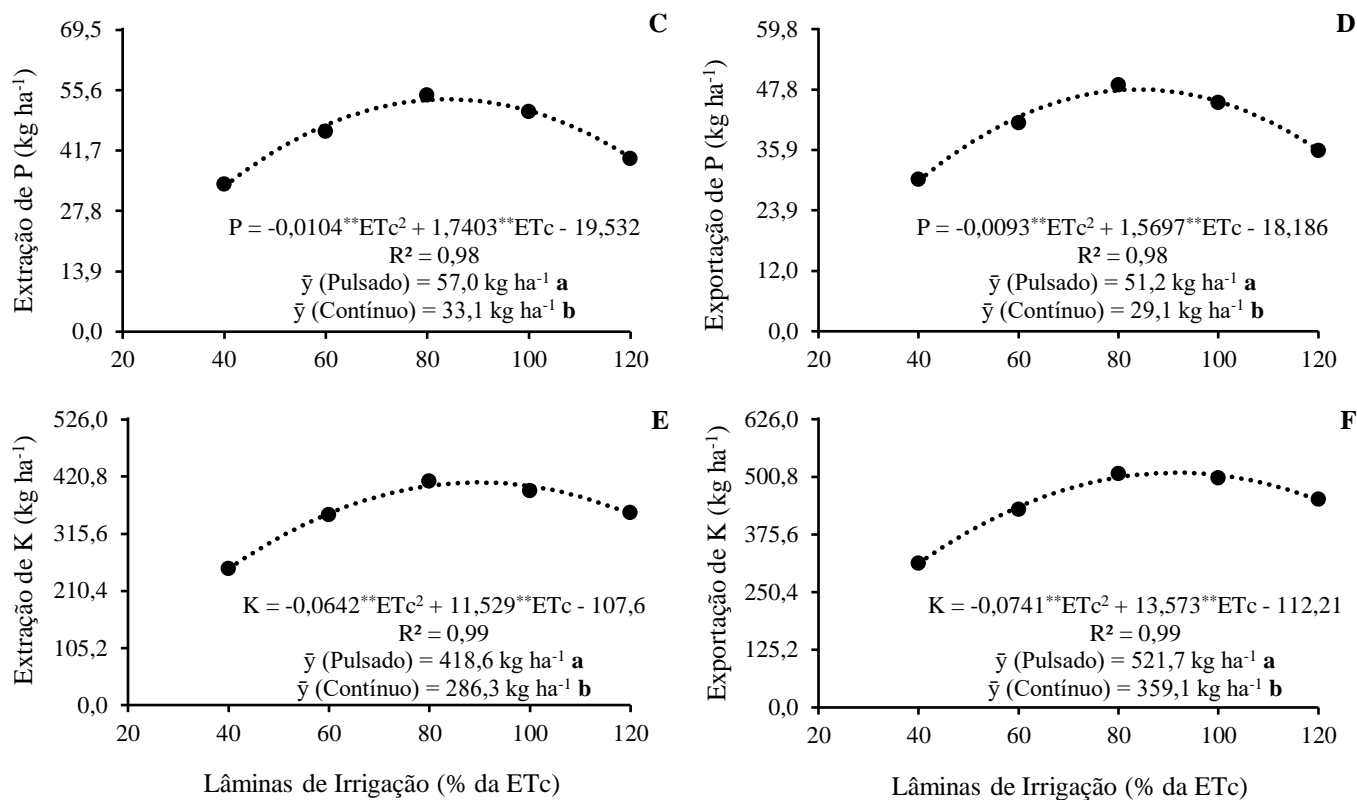
cultivo com irrigação plena, Oliveira et al. (2010) obtiveram para BSPA e BSC uma produção de 7,5 e 55 Mg ha⁻¹ para a cultivar SP79-1011, e 12 e 72 Mg ha⁻¹ para a cultivar RB92579, respectivamente.

Essas diferenças na produção de BSPA e BSC entre as cultivares, podem estar associadas às condições climáticas do período em que o estudo foi realizado e também às características genéticas de cada variedade. A esse respeito, Wanderley et al. (2021) afirmam que a produtividade da cana-de-açúcar e a exigência de nutrientes estão relacionadas às características genéticas, disponibilidade de água e nutrientes e ciclo produtivo (planta ou cana-soca). Sob condições de déficit hídrico, a produtividade da cana-de-açúcar é severamente afetada, devido a várias reações, a exemplo do fechamento estomático, que causa inibição do crescimento e da produção de açúcar (Garcia et al., 2020).

Possivelmente, devido a manutenção da umidade do solo mais constante, a irrigação por pulsos contribuiu para o aumento da produção de biomassa seca da cana-de-açúcar. De acordo com Zamora et al. (2021), com a irrigação pulsada o bulbo húmido se mantém constante por mais tempo, devido as melhores condições de disponibilidade hídrica e redução de percas por evaporação ou percolação profunda. Estudando a cultura do coentro sob fertirrigação pulsada, Menezes et al. (2020) observaram que a técnica favoreceu o acúmulo de matéria seca na cultura.

A maior extração de N pela cultura da cana-de-açúcar (Figura 4A), foi de 225,9 kg ha⁻¹, obtida na lâmina de irrigação correspondente a 101,9% da ETc apresentando um ganho de 51,8% em relação a menor lâmina avaliada (40% ETc - 148,8 kg ha⁻¹). Quanto à exportação de N (Figura 4B), o máximo exportado do nutriente pela cultura foi de 174,1 kg ha⁻¹ com a reposição de 104,4% da ETc, incremento de 50,1% em relação a lâmina de 40% da ETc, cuja exportação de N foi de 115,6 kg ha⁻¹.





******, ***** - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey para os tipos de irrigação pulsada e contínua.

Figura 4. Extração e exportação de nitrogênio (A e B), fósforo (C e D) e potássio (E e F), respectivamente, na cultura da cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (ETc) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).

O nitrogênio é um nutriente essencial, necessário às plantas para a realização das suas atividades metabólicas efetivas e, conseqüentemente, tem relação direta com a qualidade da cana-de-açúcar colhida (Vuyyuru et al., 2019). Estudos sobre a nutrição mineral da cana-de-açúcar (RB92579) em condição de cultivo irrigado, apresentaram valores de extração e exportação de N, respectivamente, de 260 e 167,4 kg ha⁻¹ (Oliveira et al., 2011); 191,89 e 124,75 kg ha⁻¹ (Salviano et al., 2017); 171 e 122 kg ha⁻¹ (Lira et al., 2019).

O acúmulo de nutrientes pelas culturas é influenciado por diversos fatores, entre eles a disponibilidade hídrica, as características físico-químicas do solo e o genótipo estudado. A esse respeito, Wanderley et al. (2021) afirmam que a demanda nutricional da cana-de-açúcar difere entre as variedades, que podem ser mais ou menos exigentes nutricionalmente, fato que tem relação direta com a capacidade produtiva de cada genótipo. O fornecimento hídrico adequado é recomendado para que haja uma nutrição equilibrada sem causar deficiência ou gastos desnecessários de fertilizantes. Silva et al. (2017) obtiveram redução no acúmulo de N no colmo e na parte área da

cana-de-açúcar em função do aumento do estresse hídrico. Os autores associaram a redução dos níveis de N na planta à limitação da movimentação desse nutriente no solo, o que se refletiu na redução da sua absorção pelas raízes das plantas.

A técnica da irrigação por pulsos proporcionou um incremento de 47,2% na extração de N pela cultura, quando comparado com a irrigação aplicada de forma contínua (Figura 4A). Em relação a exportação de N (Figura 4B), verifica-se que a irrigação pulsada promoveu um aumento de 50,8% na exportação de N, em relação a irrigação aplicada de forma contínua.

A irrigação pulsada permite uma melhor distribuição da umidade do solo ao longo do tempo, devido ao fracionamento da lâmina de irrigação diária. Com a manutenção da umidade na zona rizosférica, os processos de absorção de nutrientes são favorecidos. De acordo com Didier et al. (2018), o fornecimento hídrico adequado mantém a umidade do solo em condições ideais para a disponibilização e absorção dos elementos minerais necessários ao crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar. O transporte de N no solo se dá por fluxo de massa, que depende da taxa de fluxo de água pelo solo em direção as raízes das plantas (Taiz et al., 2017). Logo, a irrigação por pulsos favorece o fluxo de massa em função da manutenção da umidade do solo de forma mais constante.

Diante dos resultados, pode-se constatar que o quantitativo de N extraído e exportado pela cana-de-açúcar foi superior ao N disponibilizado às plantas via fertilização. Isso pode ocorrer devido a ocorrência de processos como a mineralização da matéria orgânica e de resíduos de palhada de ciclos anteriores presentes no solo, a absorção de nitrato pelas raízes mais profundas, a precipitação atmosférica e fixação biológica do N atmosférico por microrganismos (Oliveira et al., 2011; Taiz et al., 2017).

A maior quantidade de P extraída pela cultura da cana-de-açúcar foi de 53,27 kg ha⁻¹, obtida na lâmina correspondente a 83,7% da ETc (Figura 4C), com incremento 59,3% em relação a menor lâmina estudada (40% da ETc), cuja extração foi de 33,44 kg ha⁻¹. Para o conteúdo de P exportado pela cultura (Figura 4D), a lâmina de 84,4% da ETc promoveu maior exportação de P (48,1 kg ha⁻¹), com aumento percentual de 62% em relação da lâmina de 40% da ETc (29,7 kg ha⁻¹).

O P apresenta grande importância para a cultura da cana-de-açúcar, devido a sua participação em vários processos metabólicos, por isso sua deficiência deve ser suprida visando maior crescimento das plantas, aumento na produtividade e na qualidade do açúcar recuperável (Bhatt et al., 2021). De acordo com (Bhatt, 2020), a disponibilidade de P para as plantas, absorvido por meio das raízes, depende de vários fatores, dentre os quais a classe de textura e estrutura do solo, pH do solo, condutividade elétrica, teor de umidade disponível, entre outros.

O aumento do estresse hídrico, causado pela redução das lâminas de irrigação e pelo excedente hídrico aplicado, levou a redução no conteúdo de P extraído e exportado pela cana-de-açúcar. Silva et al. (2017), estudando a cultura da cana-de-açúcar sob efeito de estresse hídrico, observaram que a redução do potencial hídrico do solo reduziu o acúmulo de P, os autores associam os níveis mais baixos de P nas plantas, provavelmente, a limitações na movimentação desse nutriente no solo, o que pode ter afetado a absorção pelas raízes das plantas.

Em relação ao excesso de água no solo, Costa et al. (2016) obtiveram redução no acúmulo de P em cana-de-açúcar na maior lâmina de irrigação aplicada. Os autores argumentaram que, a alta solubilidade de sais orgânicos na água favorece a absorção de nutrientes pelas plantas, porém o excesso de água pode ser prejudicial, promovendo a lixiviação de nutrientes. Estudos sobre cana-de-açúcar irrigada com a variedade RB92579 encontraram valores de extração e exportação de P de 25,2 e 16 kg ha⁻¹ (Oliveira et al., 2011); 49,01 e 36,96 kg ha⁻¹, (Salviano et al., 2017); 20 e 13 kg ha⁻¹ (Lira et al., 2019), respectivamente. O acúmulo de P pelas plantas pode variar em função da cultivar analisada, condições de umidade do solo, pH do solo e disponibilidade do nutriente. Sendo essa uma possível justificativa para a diferença entre os valores encontrados na literatura e os obtidos com este estudo.

Analisando o tipo de aplicação da lâmina de irrigação, verificou-se que a irrigação pulsada promoveu um incremento de 72,2% no conteúdo de P extraído pela cana, em relação a irrigação contínua (Figura 4C). Já para o conteúdo de P exportado pela cana, a irrigação pulsada possibilitou a maior exportação deste nutriente pela cultura, revelando um incremento de 75,9% quando comparado à irrigação aplicada de forma contínua (Figura 4D). Estudos com irrigação pulsada sobre a nutrição mineral das plantas apresentaram benefícios dessa técnica em relação ao acúmulo de P na cultura do pimentão (Assouline et al., 2006); abacate (Silber et al., 2012) e coentro (Menezes et al., 2020).

A manutenção da umidade do solo devido ao fracionamento da aplicação da lâmina de irrigação diária pode melhorar a absorção de P pelas plantas. De acordo com Crusciol et al. (2013), o suprimento de P para as raízes das plantas é impulsionado principalmente pelo processo de difusão, que depende da umidade do solo e da superfície radicular em contato com o solo. Entretanto, a umidade do solo interfere diretamente no desenvolvimento radicular, influenciando direta ou indiretamente no fornecimento de P para as plantas (Taiz et al., 2017).

Para o K (Figura 4E), o maior conteúdo extraído do nutriente foi de 410 kg ha⁻¹, na lâmina correspondente a 89,8% da ETc, apresentando um incremento de 63,5% em relação a lâmina de 40% da ETc, cuja extração de K foi de 250,8 kg ha⁻¹. A quantidade de K exportado pela cana-de-

açúcar atingiu o ponto máximo de 509,3 kg ha⁻¹, na lâmina correspondente a 91,6% da ETc (Figura 4F), com incremento de 63,1% em relação ao quantitativo exportado do nutriente (312,2 kg ha⁻¹) na lâmina correspondente a 40% da ETc.

O K é o nutriente mais requerido para o cultivo da cana-de-açúcar, cuja média da quantidade extraída varia em torno de 0,83 a 2,08 kg K para cada tonelada de colmo produzida (Malavolta, 2006; Gopaldasundaram et al., 2012). Esse comportamento ocorre em plantas que acumulam sacarose, como é o caso da cana-de-açúcar, sendo o K essencial para a síntese e acúmulo desse carboidrato, atuando ainda na melhoria do desenvolvimento radicular e na eficiência do uso de água e N (Andrade et al., 2022; Bhatt, 2020).

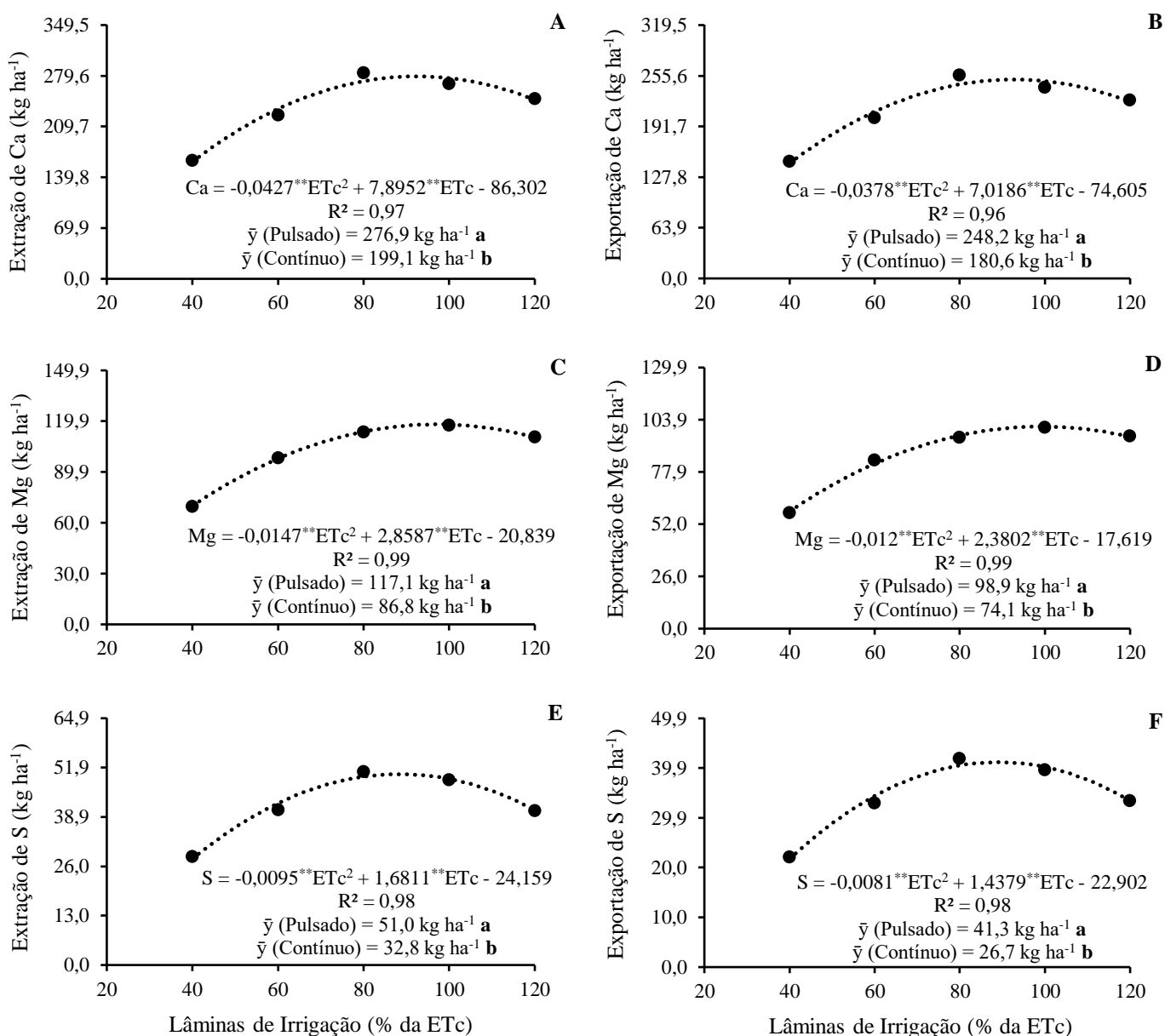
Assim como para o N e P, a extração e exportação de K foi reduzida em função da redução das lâminas de irrigação, evidenciando os efeitos deletérios que o estresse hídrico pode causar na absorção desses nutrientes. Bem como o excesso hídrico pode causar o efeito diluição e também reduzir as concentrações desses nutrientes nos órgãos das plantas. Corroborando com estes resultados, Bhatt et al. (2021) e Silva et al. (2017) também obtiveram redução no acúmulo de NPK em cana-de-açúcar sob efeito de estresse hídrico.

Em cana-de-açúcar irrigada, Oliveira et al. (2011) também obtiveram elevadas taxas de extração e exportação de K, na ordem de 404,4 kg ha⁻¹ e 235,2 kg ha⁻¹, respectivamente, para a cultivar SP813250. Gonçalves et al. (2019), estudando a nutrição mineral da cana-de-açúcar, variedade RB867515, sob irrigação subsuperficial, obtiveram uma extração de 434,3 kg ha⁻¹ de K. Salviano et al. (2017) obtiveram 441,17 e 332,13 kg ha⁻¹ de extração e exportação de K, respectivamente, para a cultivar RB92579 sob cultivo irrigado. A elevada extração e exportação de K, no presente estudo pode estar associado ao melhor aproveitamento do fertilizante aplicado via fertirrigação por gotejamento subsuperficial.

A irrigação pulsada proporcionou maior extração de K, com incremento de 46,2% em relação ao total extraído quando a irrigação foi aplicada de forma convencional (Figura 4E). Houve incremento de 45,3% na exportação de K, quando a irrigação foi aplicada em de forma pulsada (Figura 4F). A irrigação por pulsos também favoreceu o acúmulo de K no tecido das plantas de pimentão (Assouline et al., 2006) e coentro (Menezes et al., 2020), quando comparado com a irrigação contínua.

Verifica-se que houve efeito das lâminas de irrigação e dos tipos de aplicação da irrigação sobre a extração e exportação de Ca, Mg e S pela cultura da cana-de-açúcar (Figura 5). Para o macronutriente Ca (Figura 5A), a lâmina correspondente a 92,5% da ETc proporcionou a maior extração, com valor de 278,7 kg ha⁻¹, evidenciando um aumento percentual de 73% em relação a

extração de 161,2 kg ha⁻¹ obtida no menor nível de estresse hídrico avaliado (40% da ETc). Em relação a quantidade de Ca exportada (Figura 5B) sob efeito das lâminas de irrigação, a maior quantidade exportada desse nutriente foi de 251,2 kg ha⁻¹, na lâmina correspondente a 92,8% da ETc, proporcionando um incremento de 72,4% em relação a lâmina de 40% da ETc (145,7 kg ha⁻¹).



** - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey para os tipos de irrigação pulsada e contínua.

Figura 5. Extração e exportação de cálcio (A e B), magnésio (C e D) e enxofre (E e F), respectivamente, na cultura da cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (% ETc) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).

A redução da lâmina de irrigação aplicada, ou seja, o aumento do estresse hídrico, bem como o excesso de água, reduziu consideravelmente o conteúdo de Ca extraído e exportado pela cana-de-açúcar. O cálcio é um nutriente essencial que regula o crescimento e o desenvolvimento das plantas e pode atuar como um mensageiro secundário na mediação de respostas complexas a vários estímulos ambientais e também no desenvolvimento vegetativo (Srivastava et al., 2013).

Corroborando com estes resultados, Ribeiro (2016) obteve redução de 79% na extração de Ca quando reduziu em 50% a lâmina de irrigação. Estudos com cana de açúcar irrigada (RB92579) apresentaram valores de extração e exportação de Ca de 305,5 e 265,5 kg ha⁻¹ (Oliveira et al., 2011), 161 e 129 kg ha⁻¹ (Lira et al., 2019), respectivamente. As maiores diferenças entre os valores de extração e exportação de Ca constatadas entre as pesquisas podem estar associadas ao fato de ser cultivares diferentes, ou a realização de calagem na área experimental (Oliveira et al., 2011).

Houve um incremento de 39,1% na quantidade de Ca extraída pela cultura, quando a irrigação foi aplicada de forma pulsada (Figura 5A). Para a exportação de Ca (Figura 5B), houve incremento de 37,4% da irrigação pulsada em relação à contínua. Possivelmente a manutenção da umidade do solo sob condição da irrigação pulsada favoreceu a mineralização da matéria orgânica do solo e a absorção de Ca pela cana-de-açúcar. Resultado semelhante foi obtido por Menezes et al. (2020) para a cultura do coentro, no qual a irrigação pulsada proporcionou maior acúmulo de Ca.

A maior extração de magnésio foi de 118,1 kg ha⁻¹, obtida na lâmina de irrigação correspondente a 97,2% da ETc (Figura 5C), em relação a lâmina de 40% da ETc houve um incremento de 68,7%, cuja extração de Mg foi de 70 kg ha⁻¹. A exportação de Mg (Figura 5D) seguiu o mesmo comportamento da extração, no qual o maior valor exportado foi de 100,4 kg ha⁻¹ obtido na lâmina de 99,2% da ETc e um incremento de 72% sobre a lâmina de 40% da ETc, cujo valor exportado foi de 58,4 kg ha⁻¹. A irrigação pulsada incrementou em 35% a extração (Figura 5C) e 33,5% a exportação (Figura 5D) de Mg, quando comparado com a irrigação aplicada de forma contínua.

Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira et al. (2011) em cana-de-açúcar irrigada (RB92579), no qual os autores obtiveram valores de extração e exportação de Mg de 121,8 e 99 kg ha⁻¹, respectivamente. Lira et al. (2019) apresentaram resultados de 89 e 65 kg ha⁻¹ para extração e exportação de Mg, respectivamente para a cultivar RB92579 sob cultivo irrigado. O aumento do estresse hídrico dificulta a mobilidade dos nutrientes na solução do solo,

o Mg apresenta alta mobilidade no solo, porém o excesso de água pode causar lixiviação. Acredita-se que a água de irrigação distribuída de forma pulsada possa manter a umidade do solo em níveis adequados ao longo do dia, favorecendo a absorção de nutrientes como Mg. Menezes et al. (2020) obtiveram maior acúmulo de Mg na cultura do coentro com a irrigação pulsada.

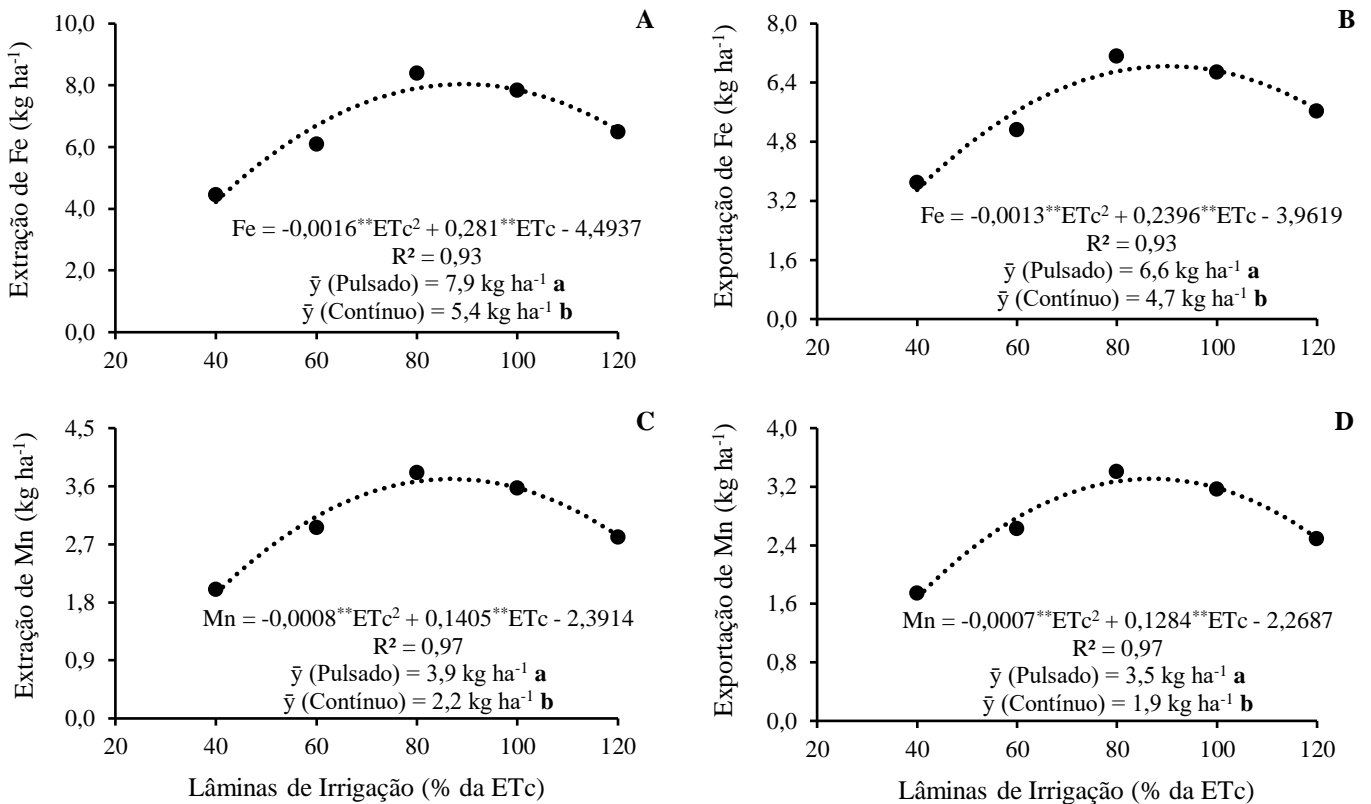
Em relação ao S, a lâmina de irrigação correspondente a 88% da ETc proporcionou maior extração (Figura 5E) e exportação (Figura 5F) de S, com valores de 50,2 e 40,9 kg ha⁻¹, respectivamente. O maior nível de estresse hídrico (40% ETc) reduziu em 80 e 88% a extração e exportação de S, com valores de 27,9 e 21,7 kg ha⁻¹, respectivamente. Para o S também foi possível observar o benefício da irrigação pulsada, que incrementou em 55% o total do nutriente extraído e exportado pela cana-de-açúcar (Figura 5E e 5F).

Com a aplicação de lâminas superiores a 88% da ETc pode ter ocorrido a lixiviação do sulfato, reduzindo assim a absorção do nutriente pela cana-de-açúcar. Nesse aspecto, a irrigação pulsada pode reduzir as perdas de nutrientes por lixiviação. Lira et al. (2019) obtiveram valores de extração e exportação de S para cana-de-açúcar (RB92579) irrigada, de 30 e 20 kg ha⁻¹, respectivamente. Salviano et al. (2017) obtiveram valores de 37 e 26 kg ha⁻¹ para extração e exportação, respectivamente, com cultivar de cana-de-açúcar RB92579 sob cultivo irrigado. A irrigação pulsada também favoreceu o acúmulo de S na cultura do coentro, quando comparado com a irrigação contínua (Menezes et al., 2020).

De acordo com Tiecher et al. (2013), o S do solo é encontrado predominantemente na forma orgânica. Assim, a capacidade do solo em suprir a demanda da planta pelo nutriente está estreitamente relacionada ao teor de matéria orgânica e sua mineralização, que, gradualmente, disponibilizará o S na forma de sulfato para a solução do solo, o qual poderá ser absorvido pelas plantas. Os resultados elevados de S no presente trabalho podem ter relação com o teor de matéria orgânica do solo, também com a intensificação da mineralização da matéria orgânica em função da umidade do solo provinda da irrigação, e ainda pode ter relação com a dose de nitrogênio aplicada (150 kg ha⁻¹). De acordo com Ribeiro (2016), o nitrogênio apresenta efeito sinérgico com o enxofre, logo um suprimento adequado de nitrogênio pode contribuir para o melhor aproveitamento do enxofre mineral do solo.

A extração de Fe pela cultura da cana-de-açúcar (Figura 6A) reduziu em 54% em função do aumento do estresse hídrico. A maior extração do micronutriente pela cultura foi de 7,8 kg ha⁻¹, na lâmina correspondente a 88% da ETc, enquanto na lâmina de 40% da ETc a extração de Fe foi de 4,2 kg ha⁻¹. Em relação à quantidade exportada de Fe (Figura 6B), houve redução

de 49,3% com a redução da lâmina de irrigação. A maior quantidade de Fe exportada foi de 7,1 kg ha⁻¹, na lâmina correspondente a 92,2% da ETc, a menor exportação de Fe foi de 3,5 kg ha⁻¹, na lâmina correspondente a 40% da ETc. A irrigação por pulsos incrementou em 46,3 e 40,4% a extração (Figura 6A) e a exportação (Figura 6B) de Fe, respectivamente.



**,* - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey para os tipos de irrigação pulsada e contínua.

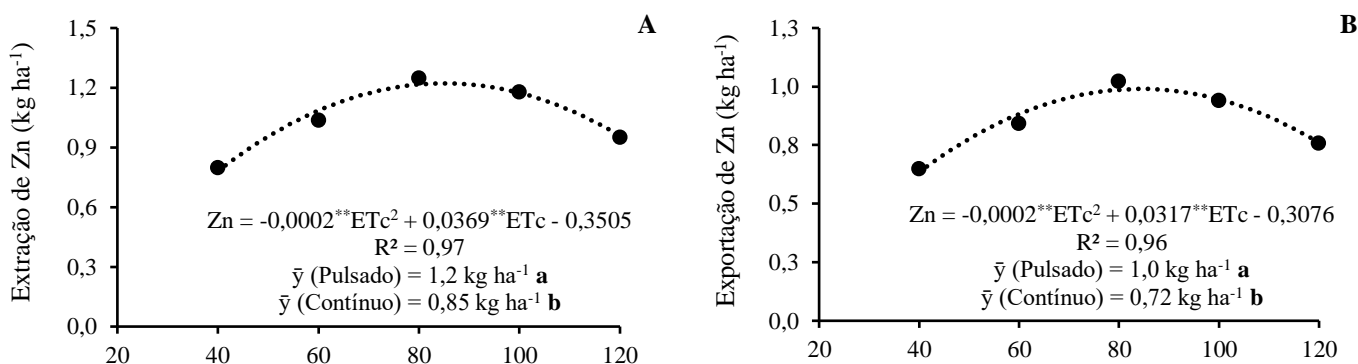
Figura 6. Extração e exportação de ferro (A e B) e manganês (C e D), respectivamente, na cultura da cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (ETc) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).

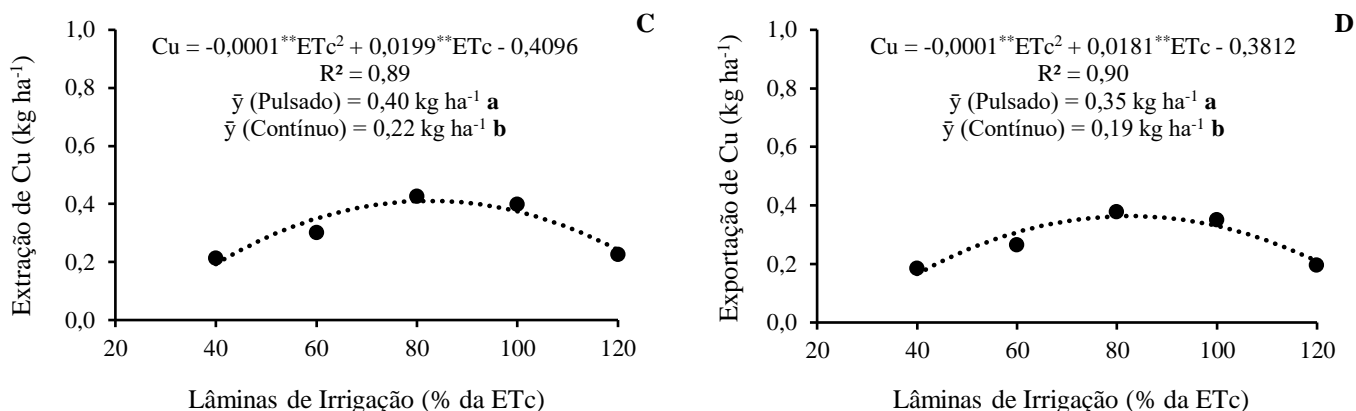
Assim como para os demais nutrientes, o aumento do estresse por déficit hídrico reduz a absorção de Fe pelas plantas podendo causar deficiência desse nutriente, bem como o excesso de água pode causar perdas por lixiviação ou provocar o efeito diluição do nutriente no tecido vegetal. Estudando o acúmulo de Fe na cultura do milho sob estresse hídrico Ibrahim et al. (2020) observaram que a absorção de Fe foi suprimida pelo aumento do estresse hídrico. Os autores afirmaram ainda que o estresse hídrico afeta fortemente a absorção de nutrientes e pode restringir a translocação de alguns nutrientes entre os órgãos das plantas.

Estudando a nutrição mineral da cana-de-açúcar, Udayakumar e Jemila (2016) obtiveram uma extração de Fe de 7,31 kg ha⁻¹, sob cultivo irrigado. Morais et al. (2022) obteve valores de extração e exportação de Fe de 5,9 e 4,47 kg ha⁻¹, respectivamente para a cultivar RB92579 sob cultivo irrigado. A irrigação pulsada também favoreceu o acúmulo de Fe em plantas de coentro (Menezes et al., 2020).

A maior extração de Mn ocorreu na lâmina de 88% da ETc (Figura 6C), com valor máximo de 3,8 kg ha⁻¹, com incremento de 90% em relação a lâmina de 40% da ETc (2 kg ha⁻¹). Quanto à exportação de Mn (Figura 6D), o valor máximo foi de 3,6 kg ha⁻¹, obtido na lâmina correspondente a 92% da ETc. Em ambos casos, extração e exportação de Mn (Figura 6C e 6D), a irrigação pulsada se sobressaiu a irrigação contínua, com incrementos de 77 e 84%, respectivamente. Valores similares foram sugeridos por Ribeiro (2016), que obteve uma extração de Mn em cana-de-açúcar irrigada, cultivar RB92579, de 2,63 kg ha⁻¹. Morais et al. (2022) obteve valores de 4,7 e 3,4 kg ha⁻¹ de extração e exportação de Mn, respectivamente.

A maior extração de Zn foi de 1,34 kg ha⁻¹, repondo 92,3% da ETc (Figura 7A). A exportação de Zn atingiu o máximo valor de 0,96 kg ha⁻¹, repondo 79,3% da ETc (Figura 7B). Analisando os valores de extração e exportação de Zn obtidos na menor lâmina de irrigação aplicada (40% da ETc) que foram de 0,81 e 0,64 kg ha⁻¹, observa-se reduções de 58 e 48,4%, respectivamente, quando comparado com a lâmina de máxima eficiência descrita anteriormente. A irrigação pulsada incrementou em 41,2 e 39% o valor de Zn extraído (Figura 7A) e exportado (Figura 7B), respectivamente, quando comprado com a irrigação aplicada de forma contínua.





******, ***** - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey para os tipos de irrigação pulsada e contínua.

Figura 7. Extração e exportação de zinco (A e B) e cobre (C e D), respectivamente, na cultura da cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (ETc) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).

Estudando a nutrição mineral da cana-de-açúcar, cultivar RB92579, sob cultivo irrigado, Morais et al. (2022) obtiveram valores de extração e exportação de $0,91$ e $0,53$ kg ha⁻¹, respectivamente. Silva et al. (2018) obtiveram uma exportação de $0,34$ kg ha⁻¹ em cana-de-açúcar sob sistema de cultivo em sequeiro. Mesmo no maior nível de estresse hídrico analisado no presente estudo (40% da ETc), a extração de Zn foi superior ao valor obtido pelos autores em cultivo de sequeiro. Esse fato pode ter relação com as diferentes características químicas do solo em ambos estudos, ou pela não realização do manejo nutricional com micronutrientes pelos autores da pesquisa, ou ainda pela diferença entre as cultivares estudadas em ambos experimentos.

Em relação à extração de Cu (Figura 7C), o maior valor obtido foi de $0,58$ kg ha⁻¹, na lâmina correspondente a 99,5% ETc, representando um acréscimo de 152% sobre o valor obtido na lâmina de 40% da ETc ($0,23$ kg ha⁻¹). Quando a exportação de Cu (Figura 7D), o ponto máximo foi de $0,44$ kg ha⁻¹, obtido na lâmina correspondente a 91% da ETc, apresentando um incremento de 144% sobre a quantidade de Cu exportada pela cana-de-açúcar na lâmina de 40% ad ETc ($0,18$ kg ha⁻¹). Analisando o tipo de aplicação da irrigação, verifica-se que a irrigação pulsada incrementou a extração (Figura 7C) e a exportação (Figura 7D) de Cu em 82 e 84%, quando comparado com a irrigação aplicada de forma contínua.

Os valores de extração e exportação de Cu obtidos por Morais et al. (2022), foram de $0,80$ e $0,43$ kg ha⁻¹, respectivamente, para a cultivar RB92579. Ribeiro (2016), também para a

cultivar RB92579, obteve uma extração de Cu de $0,44 \text{ kg ha}^{-1}$. Resultados similares aos obtidos no presente estudo.

Analisando o efeito da irrigação pulsada, observa-se que essa técnica favoreceu a absorção de micronutrientes pela cultura da cana-de-açúcar. Esse fato possivelmente tem relação com a manutenção da umidade do solo ao longo do tempo, favorecendo a mineralização da matéria orgânica e o carreamento dos nutrientes minerais pela solução do solo até as zonas de absorção de água e nutrientes das raízes. Estudando a irrigação pulsada na cultura do coentro, Menezes et al. (2020) observaram que a absorção de Fe, Mn, Zn e Cu foi favorecida por esta técnica, quando comparada com a irrigação aplicada de forma contínua.

A ordem de extração dos nutrientes não variou em relação irrigação pulsada ou contínua, mantendo a mesma ordem decrescente em ambos os tipos de aplicação, sendo: $\text{K} > \text{Ca} > \text{N} > \text{Mg} > \text{P} > \text{S} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$. Morais et al. (2022), estudando níveis salinos e fração de lixiviação em cana-de-açúcar (RB 92579), obtiveram para a condição sem fração de lixiviação e condutividade elétrica (CE) da água de $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ a seguinte ordem decrescente de extração de nutrientes: $\text{N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P} > \text{S} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$.

Ribeiro (2016), estudando a nutrição mineral de diferentes cultivares de cana-de-açúcar sob cultivo irrigado, obteve a seguinte ordem decrescente de extração de nutrientes: $\text{K} > \text{N} > \text{Ca} > \text{S} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu}$. Lira et al. (2019) estudando os efeitos da salinidade na nutrição mineral da cana-de-açúcar BRR92579, na CE de $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ obtiveram a seguinte ordem decrescente de macronutrientes: $\text{K} > \text{Ca} > \text{N} > \text{Mg} > \text{S} > \text{P}$. As diferenças entre a ordem de extração do presente estudo e a literatura citada, pode estar associada ao fato de ser cultivares diferentes, e ao manejo de fertilização empregado em cada estudo.

A ordem decrescente de exportação de nutrientes pela cana-de-açúcar cultivar RB041443 seguiu a mesma sequência da ordem de extração de nutrientes e não diferiu em função do tipo de aplicação da irrigação (pulsada ou contínua), sendo: $\text{K} > \text{Ca} > \text{N} > \text{Mg} > \text{P} > \text{S} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$. Morais et al. (2022), para a cultivar RB92579 obtiveram a seguinte ordem: $\text{N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P} > \text{S} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$. Silva et al. (2018) analisando a exportação de nutrientes em diferentes cultivares de cana-de-açúcar em condições de cultivo em sequeiro, obtiveram para a cultivar RB92579 a seguinte ordem: $\text{K} > \text{N} > \text{Ca} > \text{S} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$. Lira et al. (2019), para a cultivar RB92579, obtiveram a seguinte ordem de exportação de macronutrientes: $\text{K} > \text{Ca} > \text{N} > \text{Mg} > \text{P} > \text{S}$.

4. CONCLUSÕES

A redução da lâmina de irrigação reduziu a produção de biomassa seca, a extração e a exportação de nutrientes na cana-de-açúcar cultivar RB041443.

A irrigação pulsada possibilitou a obtenção de maior produção de biomassa seca dos colmos e da parte aérea e promoveu maior extração e exportação de nutrientes pela cultura.

A extração e a exportação de nutrientes pela cultura, apresentou a seguinte ordem decrescente: $K > Ca > N > Mg > P > S > Fe > Mn > Zn > Cu$.

5. REFERÊNCIAS

- Aguiar, A. T. E., Gonçalves, C., Paterniani, M. E. A. G. Z., Tucci, M. L. S. A., Castro, C. E. F. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas - Boletim 200. 7ª Ed. Campinas: Instituto Agronômico, 2014. 452p. (Boletim IAC, n° 200).
- Almeida, W. F., Paz, V. P. S., Jesus, A. P. C., Silva, J. S., Gonçalves, K. S., Oliveira, A. S. Yield of green beans subjected to continuous and pulse drip irrigation with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 7, p. 476-481, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p476-481>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves J. L. M., Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift. Stuttgart*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- Alves, H. K. M. N., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Souza, C. A. A., Leite, R. M. C., Silva, G. I. N., Souza, L. S. B., Silva, T. G. F. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, p. 373-392, 2022. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p373-392>
- Andrade, A. F., Flores, R. A., Casaroli, D., Bueno, A. M., Souza, M. A. P., Jardim, C. C. S., Abdala, K. O., Marques, E. P., Mesquita, M. Biometric and Physiological Relationships and Yield of Sugarcane in Relation to Soil Application of Potassium. *Sugar Tech*, v. 24, p. 473-484, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01032-z>
- Assouline, S., Möller, M., Cohen, S., Ben-Hur, M., Grava, A., Narkis, K., Silber, A. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, p.1556-1568, 2006. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0365>
- Bezerra Neto, E., Barreto, L. P. Análises químicas e bioquímicas em plantas. 1 ed. Recife: UFRPE, Editora Universitária da UFRPE, 2011. 267p.
- Bhatt, R. Resources management for sustainable sugarcane production. In resources use efficiency in agriculture. Springer, Singapore, p. 647-693, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6953-1_18
- Bhatt, R., Oliveira, M. W., Silva, V. S. G. Sugarcane nutrition for food and environmental security/ Nutrição da cana-de-açúcar para segurança alimentar e ambiental. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 6, p. 64431-64467, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n6-701>

- Cavalcanti, F. L. A.; Santos, J. C. P.; Pereira, J. R.; Leite, J. P.; Silva, M. C. L.; Freire, F. J.; Silva, D. J.; Sousa, A. R.; Messias, A. S.; Faria, C. M. B.; Burgos, N.; Lima Júnior, M. A.; Gomes, R. V.; Cavalcanti, A. C.; Lima, J. F. V. F. *Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco. 2ª aproximação. 3 ed. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco-IPA, 2008. 212p.*
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. *Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar, Quarto Levantamento: Safra 2021/2022. CONAB, Brasília, Brasil, v. 8, n. 4, 2022.*
- Cormier, J., Depardieu, C., Letourneau, G., Boily, C., Gallichand, J., Caron, J. *Tensiometer-based irrigation scheduling and water use efficiency of field-grown strawberries. Agronomy Journal, v. 112, p. 2581-2597, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20205>*
- Costa, A. R. F. C., Rolim, M. M., Silva, E. M. B., Simões Neto, D. E., Pedrosa, E. R. M., Silva, E. F. F. *Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in sugarcane cultivated under different types of water management and doses of nitrogen. Australian Journal of Crop Science, v. 10, n. 3, p. 362-369, 2016. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.03.p7205>*
- Crusciol, C. A. C., Nascente, A. S., Mauad, M., Silva, A. C. D. L. *Desenvolvimento radicular e aéreo, nutrição e eficiência de absorção de macronutrientes e zinco por cultivares de arroz de terras altas afetadas pela adubação fosfatada. Semina: Ciências Agrárias, v. 34, n. 5, p. 2061-2076, 2013. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n5p2061>*
- Daker, A. *A Água na Agricultura: Irrigação e Drenagem. 6.ed. v.3. Rio de Janeiro: Freitas Basto, 1984. 543p.*
- Didier, K. K., Jean-Martial, K. K. F., Gaston, K. K. *Soil moisture management and mulch impact on sugarcane yields under irrigated and rainfed conditions in Côte d'Ivoire. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, v. 12, n. 5, p. 381-390, 2018.*
- Dingre, S. K., e Gorantiwar, S. D. *Soil moisture based deficit irrigation management for sugarcane (Saccharum officinarum L.) in semiarid environment. Agricultural Water Management, v. 245, p. 106549, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106549>*
- Doorenbos, J., Kassan, A. H. *Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33), 1994. 306p.*
- Doorenbos, J. Y; Pruitt, W. O. *Crop water requirements. FAO Estudio de Riego y Drenaje, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, n. 24, 1977. 144p.*

- Eid, A. R., Bakry, B. A., Taha, M. H. Effect of pulse drip irrigation and mulching systems on yield, quality traits and irrigation water use efficiency of soybean under sandy soil conditions. *Agricultural Sciences*, v. 4, n. 5, p. 249-261, 2013. <https://doi.org/10.4236/as.2013.45036>
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- Ferreira, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.
- Garcia, F. H. S., Mendonça, A. M. C., Rodrigues, M., Matias, F. I., Silva Filho, M. P., Santos, H. R. B., Taffner, J. Barbosa, J. P. R. A. D. Water deficit tolerance in sugarcane is dependent on the accumulation of sugar in the leaf. *Annals of Applied Biology*, v. 176, p. 65-74, 2020. <https://doi.org/10.1111/aab.12559>
- Gonçalves, I. Z., Barbosa, E. A. A., Santos, L. N. S., Nazario, A. A., Feitosa, D. R. C., Tuta, N. F., Matura, E. E. Nutritional balance and production of sugarcane irrigated with treated wastewater through subsurface drip. *Irrigation Science*, v. 37, p. 207-217, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00620-y>
- Gopalasundaram, P., Bhaskaran, A., Rakkiyappan, P. Integrated Nutrient Management in Sugarcane. *Sugar Tech*, v. 14, n. 1, p. 3-20, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12355-011-0097-x>
- Ibrahim, M. F. M., Abd El-Samad, G., Ashour, H., El-Sawy, A. M., Hikal, M., Elkelish, a. Regulation of agronomic traits, nutrient uptake, osmolytes and antioxidants of maize as influenced by exogenous potassium silicate under deficit irrigation and semiarid conditions. *Agronomy*, v. 10, n. 8, p. 12-22, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081212>
- Keller, J., Karmeli, D. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, v. 17, n. 4, p. 678-684, 1974.
- Krishnaprabu, S. Comparative study of subsurface drip irrigation and flood irrigation systems for quality and yield of sugarcane. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, v. 6, p. 1694-1703, 2018. <https://doi.org/10.18782/2320-7051.7542>

- Lira, R. M., Silva, E. F. F., Silva, G. F., Souza, D. H. S., Pedrosa, E. M. R., Gordin, L. C. Content, extraction and export of nutrients in sugarcane under salinity and leaching fraction. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 6, p. 432-438, 2019. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n6p432-438>
- Malavolta, E. *Manual de Nutrição Mineral de Plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- Marcos, F. C. C., Silveira, N. M., Mokochinski, J. B., Sawaya, A. C. H. F., Marchiori, P. E. R., 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>
- Menezes, S. M., Silva, G. F., Silva, M. M., Morais, J. E. F., Santos Júnior, J. A., Menezes, D., Rolim, M. M. Continuous and pulse fertigation on dry matter production and nutrient accumulation in coriander. *DYNA*, v. 87, n. 212, p. 18-25, 2020. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.78569>
- Misra, V., Solomon, S., Mall, A. K., Prajapati, C. P., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., Ansari, M. I. (2020). Morphological assessment of water stressed sugarcane: A comparison of waterlogged and drought affected crop. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 27, n. 5, p. 1228-1236, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.02.007>
- Morais, J. E. F., Silva, E. F. F., Andrade, L. G. L., Menezes, S. M., Cutrim, E. O., Dantas, D. C., Silva, G. F., Rolim, M. M. Nutritional status, Na⁺ and Cl⁻ concentrations, and yield of sugarcane irrigated with brackish waters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 11, p. 863-874, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n11p863-874>
- Oliveira, E. C. A., Oliveira, R. I., Andrade, B. M. T., Freire, F. J., Júnior, M. A. L., Machado, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010.
- Oliveira, E. C. A., Freire, F. J., Oliveira, R. I., Oliveira, A. C., Santos Freire, M. B. G. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 3, p. 579-588, 2011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000300002>
- Oliveira, R. A., Hoffmann, H. P., Barbosa, G. V. S. Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar. Orgs. Curitiba: UFPR/RIDESA, 2021. 79p.

- Pessoa, G. G. F. A., Alves, A. K. S., Dantas, E. A., Almeida, L. J. M., Silva, J. A., Araújo, J. R. E. S., Silva, D. A. M., Santos, L. P. O. Dinâmica temporal da produção de cana-de-açúcar em um município do Brejo paraibano, Brasil (1995-2019). *Scientific Electronic Archives*, v. 14, p. 18-24, 2021. <https://doi.org/10.36560/141120211451>
- Ribeiro, A. C., Guimarães, P. T. G., Alvarez, V. H. V. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, 1999. 359p.
- Ribeiro, N. L. Eficiência nutricional de densidade radicular de oito variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação por gotejamento. 2016. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP. 2016.
- Salviano, A. M., Moura, M. S. B., Silva, T. G. F., Carmo, J. F. A., Brandão, E. O. Acúmulo e exportação de macronutrientes pela cana de açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Científica Intelletto*, v. 2, n. 2, p. 1-6, 2017. <https://doi.org/10.17648/intellecto-2525-9075-v2-n2-03>
- Wanderley, L. R. S., Oliveira, E. C. A., Freire, F. J., Simões Neto, D. E., Santos, R. L. Nutritional Requirement by Irrigated Brazilian Sugarcane Varieties. *Sugar Tech*, v. 23, p. 762-775, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00921-z>
- Silber, A., Israeli, Y., Levi, M., Keinan, A., Shapira, O., Chudi, G., Golan, A., Noy, M., Levkovitch, I., Assouline, S. Response of ‘Hass’ avocado trees to irrigation management and root constraint. *Agricultural Water Management*, v. 104, p. 95-103, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.003>
- Silva, F.C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.
- Silva, T. R., Cazetta, J. O., Carlin, S. D., Telles, B. R. Drought-induced alterations in the uptake of nitrogen, phosphorus and potassium, and the relation with drought tolerance in sugar cane. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 41, n. 2, p. 117-127, 2017. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017412029416>
- Silva, V. S. G., Oliveira, M. W., Ferreira, V. M., Oliveira, T. B. A., Santana, M. de B., Galvão, E. R. Stalk yield and nutrients accumulation of sugarcane varieties in three crop cycles. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 41, n. 2, p. 415-423, 2018. <https://doi.org/10.19084/RCA17051>

- Srivastava, A. K., Rai, A. N., Patade, V. Y., Suprasanna, P. Calcium signaling and its significance in alleviating salt stress in plants. *Salt Stress in Plants: Signalling, Omics and Adaptations*, v. 97, p. 197-218, 2013. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6108-1_9/COVER/
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., Murphy, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017. 888p.
- Tiecher, T., Santos, D. R., Rasche, J. W. A., Brunetto, G., Mallmann, F. J. K., Piccin, R. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada. *Bragantia*, v. 71 n. 4, p. 518-527, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052013005000010>
- Udayakumar, S., Jemila, C. Secondary and micronutrient uptake of ratoon sugarcane as influenced by integrated nutrient management strategy. *Himachal Journal of Agricultural Research*, v. 42, n. 2, p. 137-142, 2016.
- Vuyyuru, Sandhu, McCray, Erickson. (2019). Effects of Nitrogen Fertilization and Seed Piece Applied Fungicides on Establishment, Tiller Dynamics, and Sucrose Yields in Successively Planted Sugarcane. *Agronomy*, v. 9, n. 7, p. 387, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070387>
- Zamora, V. R. O., Silva, M. M., Santos Júnior, J. A., Silva, G. F., Menezes, D., Almeida, C. D. G. C. Assessing the productivity of coriander under different irrigation depths and fertilizers applied with continuous and pulsed drip systems. *Water Supply*, v. 21, n. 5, p. 2099-2108, 2021. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.008>.

CAPÍTULO III

**DESEMPENHO FISIOLÓGICO E PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB
LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO PULSADA E CONTÍNUA**

DESEMPENHO FISIOLÓGICO E PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO PULSADA E CONTÍNUA

RESUMO: A irrigação pulsada pode auxiliar o manejo de irrigação, reduzindo os efeitos deletérios do estresse hídrico e possibilitando o uso racional e sustentável dos recursos hídricos destinados aos cultivos irrigados. Com o estudo objetivou-se avaliar a fotossíntese, as trocas gasosas, a área foliar e a produção de biomassa da cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação aplicadas por gotejamento pulsado e contínuo. Para isso, conduziu-se um experimento de campo na área experimental da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), no período de dezembro de 2020 a dezembro de 2021. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 2 x 5, com quatro repetições, sendo os tratamentos constituídos por dois tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínuo) e cinco lâminas de irrigação (40, 60, 80, 100 e 120% da evapotranspiração da cultura-ETc). Para o tipo de irrigação por pulsos, foram definidos quatro pulsos com intervalo fixo de 40 minutos de repouso entre duas aplicações. O aumento do estresse hídrico reduziu as trocas gasosas, a área foliar e a produção de biomassa fresca da cana-de-açúcar. A irrigação pulsada aumentou a fotossíntese, a eficiência do uso da água e a área foliar das plantas. As produções de biomassa fresca da parte aérea e dos colmos foram aumentadas quando a irrigação foi realizada de forma pulsada. A análise de componentes principais sugeriu a irrigação pulsada com 80% da evapotranspiração da cultura como o tratamento que proporcionou os melhores índices fisiológicos e de produção de biomassa verde na cana-de-açúcar.

PALAVRAS-CHAVE: Estresse hídrico, manejo de irrigação, trocas gasosas, *Saccharum spp.*

PHYSIOLOGICAL AND PRODUCTIVE PERFORMANCE OF SUGARCANE UNDER DEPTHS AND PULSED AND CONTINUOUS IRRIGATION

ABSTRACT: Pulsed irrigation can help irrigation management, reducing the deleterious effects of water stress and enabling the rational and sustainable use of water resources destined for irrigated crops. The study aimed to evaluate the photosynthesis, gas exchange, leaf area and

biomass production of sugarcane under irrigation depths applied by pulsed and continuous drip. For this, a field experiment was carried out in the experimental area of the Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), from December 2020 to December 2021. The experimental design was randomized blocks, in a 2 x 5 factorial scheme, with four replications, with treatments consisting of two types of irrigation application (pulsed and continuous) and five irrigation depths (40, 60, 80, 100 and 120% of the ET_c-culture evapotranspiration). For the pulse irrigation type, four pulses were defined with a fixed interval of 40 minutes of rest between two applications. The increase in water stress reduced gas exchange, leaf area and production of fresh sugarcane biomass. Pulsed irrigation increased photosynthesis, water use efficiency and plant leaf area. Fresh biomass yields from shoots and stems were increased when irrigation was performed in a pulsed manner. The principal component analysis suggested pulsed irrigation with 80% of the crop's evapotranspiration as the treatment that provided the best physiological indices and the production of green biomass in sugarcane.

KEY WORDS: Water stress, irrigation management, gas exchange, *Saccharum* spp

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas de produção agrícola intensivo e sustentável enfrentam barreiras que impedem as culturas de atingirem seu potencial produtivo. Dentre essas barreiras, o déficit hídrico é um dos fatores limitantes que mais afetam o rendimento das culturas em todo o mundo (Endres et al., 2019; Ogbaga et al., 2020). Devido ao avanço das mudanças climáticas, o déficit hídrico tem se tornado um problema recorrente nas áreas de produção agrícola, no qual, a ocorrência de períodos secos mais prolongados e irregularidade pluviométrica desestabilizam e comprometem os ciclos produtivos das culturas, em especial culturas de ciclo longos como a cana-de-açúcar (Santos et al., 2019; Misra et al., 2020; Kumar et al., 2021; Zia et al., 2021).

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) é uma das principais commodities agrícolas do mundo, fato este que está associado à sua importância como fonte alimentar e bioenergética, que ocorre em detrimento ao seu alto potencial produtivo de açúcar, etanol e eletricidade, tornando essa cultura um importante componente da economia de diversos países (Matos et al.,

2020; Dlamini, 2021). A cultura é responsável por cerca de 86% da produção mundial de açúcar, sendo o Brasil, atualmente, o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e etanol, seguido por Índia e China (OCDE-FAO, 2019; Garcia et al., 2020; CONAB, 2022).

A safra brasileira 2021/2022, totalizou uma produção de 585,2 milhões de toneladas em uma área colhida de 8,32 milhões de hectares com produtividade média de 70,4 Mg ha⁻¹. Em relação à safra nacional 2020/2021, houve uma redução de 7,4% na produtividade da cana-de-açúcar, devido aos efeitos climáticos adversos, sobretudo da estiagem, durante o ciclo produtivo da cultura (CONAB, 2022). A produtividade da cana-de-açúcar é severamente afetada pela ocorrência de déficit hídrico, causando inibição do crescimento e da produção de açúcar devido, principalmente, a alterações que limitam o metabolismo fisiológico e bioquímico das plantas (Garcia et al., 2020; Misra et al., 2020).

Nesse sentido, o uso da irrigação torna-se indispensável para viabilizar aumentos na produtividade e na qualidade dos canaviais, reduzindo os riscos relacionados à insuficiência hídrica. De acordo com Dias e Sentelhas, (2019), a irrigação é essencial para atender à necessidade hídrica da cana-de-açúcar, potencializando a produção da cultura em diferentes regiões do país. No entanto, a água usada para fins de irrigação deve ser gerida de forma racional, a fim de manter a rentabilidade e a sustentabilidade da área de cultivo.

O manejo da irrigação não tem recebido a devida atenção e muitas áreas sob cultivo irrigado são frequentemente irrigadas em excesso, esgotando desnecessariamente os mananciais naturais e produzindo taxas indesejáveis de escoamento e drenagem, além de desperdício de energia Marin et al. (2020). A esse respeito, a técnica da irrigação por pulsos visa dar suporte ao manejo de irrigação e contribuir para maximização dos sistemas agrícolas irrigados. Nessa perspectiva, a irrigação por gotejamento pulsado se destaca, pois gera resultados positivos em termos de produtividade, qualidade dos produtos, economia de água e manutenção da umidade do solo, entre outros (Eid et al., 2013).

Essa técnica consiste no fracionamento da lâmina de irrigação diária, aplicada em curtos períodos cíclicos de umedecimento e repouso, o que promove uma melhor distribuição da umidade do solo ao longo do tempo. Alguns estudos apontam o uso da irrigação por pulsos como uma possível estratégia para mitigar os efeitos nocivos do déficit hídrico, devido a melhorias na distribuição e manutenção da umidade no perfil do solo ao longo do dia (Eid et al., 2013; Phogat et al., 2013; Abd-elhakim, 2019), e também ao aumento da eficiência do uso da água e da produtividade e qualidade das culturas (Bakeer et al., 2009; Eid et al., 2013; Zamora et al., 2019; Cormier et al., 2020).

Estudos sobre o cultivo de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento pulsado são incipientes na literatura, sobretudo em relação aos efeitos dessa técnica sobre os mecanismos fisiológicos das plantas em condições de déficit hídrico. Desse modo, objetivou-se avaliar as trocas gasosa e a produção de biomassa da cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de campo na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) localizada em Carpina, (07°51'24" S, 35°14'16" W, a 180 m de altitude), região da Zona da Mata do Estado de Pernambuco, no período de dezembro de 2020 a dezembro de 2021.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como As Megatérmico Tropical (tropical úmido) (Alvares et al., 2013). A precipitação média dos últimos 52 anos é de 1.149 mm, sendo que a maior concentração ocorre entre o outono e o inverno, apresentando uma média de 199,6 mm no mês mais chuvoso (junho). Foi realizada a caracterização química e física do solo da área experimental nas camadas de 0-0,20 e de 0,20-0,40 m (Tabela 1). O solo da área experimental é classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrófico abrupto (EMBRAPA, 2013).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental, e caracterização química da água utilizada para irrigação, Carpina 2022

| Camada | Características Químicas do Solo | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------------|---------------------|---|------------------|-----------------|----------------|------------------|----------------------------------|-------------|------|-------------------------------|-------|------|
| | pH | P | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Na ⁺ | K ⁺ | Al ⁺³ | H ⁺ +Al ⁺³ | SB | CTC | m | V | M.O. |
| m | H ₂ O | mg dm ⁻³ | -----cmol _c dm ⁻³ ----- | | | | | | -----%----- | | -----g kg ⁻¹ ----- | | |
| 0 - 0,20 | 5,8 | 12,0 | 5,16 | 1,05 | 0,06 | 0,12 | 0,0 | 2,8 | 6,39 | 9,19 | 0,0 | 69,53 | 19,8 |
| 0,20 - 0,40 | 5,9 | 12,0 | 2,31 | 0,93 | 0,04 | 0,07 | 0,0 | 3,0 | 3,35 | 6,35 | 0,0 | 52,76 | 18,8 |

| Camada | Características Físicas do Solo | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|-------|--------|----------------|-------------------------------|------|---|------------------|
| | Areia | Silte | Argila | Textura | Ds | Dp | θ _{CC} | θ _{PMP} |
| m | -----%----- | | | - | -----g cm ⁻³ ----- | | -----m ³ m ⁻³ ----- | |
| 0 - 0,20 | 70,9 | 12,0 | 17,1 | Franco arenoso | 1,36 | 2,63 | 0,15 | 0,10 |
| 0,20 - 0,40 | 71,0 | 9,9 | 19,1 | Franco arenoso | 1,31 | 2,56 | 0,18 | 0,12 |

| Características Químicas da Água de Irrigação | | | | | | | | | | |
|---|--------------------|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------|--------------|--|------|----------------------------|
| pH | CE | K ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Na ⁺ | Sulfatos | Alcalinidade | Cloretos | RAS | Classificação ¹ |
| - | dS m ⁻¹ | -----mg L ⁻¹ ----- | | | | | | (mmol L ⁻¹) ^{0,5} | | - |
| 6,5 | 0,2275 | 14,0 | 16,03 | 12,64 | 60,0 | 24,82 | 140,0 | 96,11 | 2,71 | C2S1 |

SB: Soma de Bases; CTC: Capacidade de Troca de Cátions; m: Saturação por alumínio; V: Saturação por Bases; M.O: Matéria Orgânica; Ds: Densidade do Solo; Dp: Densidade de Partículas; θ: Umidade Volumétrica; CE: Condutividade Elétrica; RAS: Relação de Adsorção de Sódio; ¹ - Classificação da água para fins de irrigação de acordo com Richards (1954).

O experimento foi realizado durante o ciclo correspondente a primeira soca (segunda folha). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com 10 tratamentos distribuídos em esquema fatorial 2 x 5, sendo o primeiro fator o tipo de aplicação da irrigação (irrigação por pulsos e irrigação contínua) e o segundo fator cinco lâminas de reposição da evapotranspiração da cultura (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc), com quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais

Para o tratamento correspondente a irrigação pulsada utilizou-se quatro pulsos de irrigação com intervalo de 40 minutos de repouso entre duas irrigações. A duração de cada pulso para os tratamentos pulsados foi definida após o cálculo diário da lâmina de irrigação necessária pela cultura.

Cada parcela experimental foi constituída por quatro sulcos combinados (dupla fileira de plantas) de 7 m de comprimento, espaçados por 1,4 m entre sulcos e 0,6 m entre linha de plantas, resultando em 56 m² por unidade experimental, no qual os dois sulcos combinados do centro de cada parcela (20 m²) foram considerados como área útil para realização das análises. A cultivar de cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a RB041443 desenvolvida pelo Programa de Melhoramento Genético de Cana de Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, integrante da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA) (Oliveira et al, 2021).

O plantio da área foi realizado em dezembro de 2019, com material vegetal proveniente da própria EECAC. O ciclo correspondente a cana planta (2020) iniciou com a realização do preparo e correção do solo. O manejo nutricional na cana-de-açúcar, no primeiro ciclo (cana planta) foi realizado com uma aplicação de calcário dolomítico para correção da acidez do solo, aplicando-se 0,5 Mg ha⁻¹, com o objetivo de elevar o pH e neutralizar o alumínio trocável. Na cana planta a adubação foi baseada na análise química do solo considerando a demanda nutricional da cultura de acordo com recomendação preconizada por Cavalcanti et al. (2008).

O ciclo correspondente a primeira soca, considerado para fins de análises, iniciou com o corte da cana planta em dezembro de 2020. O manejo nutricional da cana-soca foi realizado conforme recomendação preconizada por Aguiar et al. (2014) para a adubação nitrogenada, no qual aplicou-se de forma convencional 100 kg ha⁻¹ aos 55 dias após o corte (DAC) utilizando como fonte o sulfato de amônio, e 50 kg ha⁻¹ aplicada via fertirrigação utilizando como fonte a ureia.

O fósforo e o potássio foram aplicados de acordo com recomendação preconizada por Ribeiro et al. (1999), nas doses de 40 e 140 kg ha⁻¹, respectivamente, cujo o fósforo foi aplicado

todo de maneira convencional aos 55 DAC, utilizando como fonte o superfosfato triplo, e o potássio foi aplicado 80 kg ha^{-1} de forma convencional também aos 55 DAC, utilizando como fonte o cloreto de potássio, e 60 kg ha^{-1} aplicado via água de irrigação, como fonte foi utilizado o cloreto de potássio branco.

Os fertilizantes aplicados via água de irrigação, foram disponibilizados entre os meses de abril a agosto de 2021, sendo realizada uma aplicação por semana. O total aplicado nos meses de abril, maio, junho, julho e agosto foram de 20, 10, 10, 5 e 5 kg ha^{-1} para o nitrogênio e 20, 10, 10, 10 e 10 kg ha^{-1} para o potássio. A cada evento de fertirrigação aplicou-se apenas a lâmina de irrigação correspondente a 100% da ETc de forma contínua para todas as parcelas experimentais, garantindo que todo o estande de plantas tivesse as mesmas condições de nutrição.

Foi realizado um suprimento nutricional com o fertilizante mineral misto do fabricante BIOGROW de nome comercial BIOSTIM COMPLEX com garantias de magnésio ($23,1 \text{ g L}^{-1}$), boro ($2,8 \text{ g L}^{-1}$), cobre ($2,5 \text{ g L}^{-1}$), ferro (25 g L^{-1}), manganês ($21,8 \text{ g L}^{-1}$), molibdênio ($0,5 \text{ g L}^{-1}$) e zinco ($21,8 \text{ g L}^{-1}$). A recomendação do produto para cana-de-açúcar, segundo o fabricante é de 2 a 3 L ha^{-1} . Realizou-se duas aplicações do produto, a primeira realizada aos 110 DAC aplicada via foliar na dose de $2,5 \text{ L ha}^{-1}$, e a segunda foi realizada via fertirrigação aos 230 DAC na dose de 2 L ha^{-1} .

O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento subsuperficial composto por fitas gotejadoras (DN 16 mm) com emissores do tipo *in line* autocompensantes e antidrenantes, espaçados a 0,50 m e saída cilíndrica (tipo PC/AS, vazão de 1 L h^{-1}), alocadas no solo a uma profundidade de 0,20 m. O sistema era composto ainda por uma eletrobomba centrífuga de eixo horizontal (3,5 CV), um sistema de filtragem e retro lavagem com dois filtros de areia, um sistema de injeção da fertirrigação composto por um manômetro glicerinado, bico injetor venturi (1,2") e um filtro de tela (cesta 1" de 200 mesh), e um conjunto de 10 registros de esfera para o controle do fluxo de água para cada tratamento de forma individual.

O tempo de irrigação para cada tratamento foi determinado diariamente, levando em consideração a lâmina bruta de irrigação (LB), obtida pela relação entre a ETc e a eficiência de aplicação (94%) do sistema de irrigação, obtida por meio de um teste de uniformidade de distribuição de água, realizado segundo a metodologia proposta por Keller e Karmelli (1974). O parcelamento da lâmina de irrigação foi realizado de forma manual, de acordo com o tempo de duração de cada tratamento definido antes do início da irrigação.

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi estimada diariamente com base na metodologia do Tanque Classe “A”, proposta por Doorenbos e Pruitt (1977), calculada pela seguinte equação:

$$ETc = ECA \times Kp \times Kc \times Kl \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

ETc = Evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹;

ECA = Evaporação do tanque classe A, mm dia⁻¹;

Kp = Coeficiente do tanque classe A, adimensional;

Kc = Coeficiente de cultivo, adimensional, e,

Kl = Coeficiente de localização do sistema de irrigação por gotejamento, adimensional.

Os valores de Kp foram obtidos considerando dados de velocidade do vento, umidade relativa do ar e as condições de instalação do tanque classe A, que apresentava vegetação rasteira contendo bordadura de 10 m, conforme metodologia proposta por Doorenbos e Pruitt (1977). Os valores de Kc adotados no experimento seguiu a recomendação de Doorenbos e Kassam (1994) para cada estágio fenológico da cana-de-açúcar (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura

| Estádios de desenvolvimento | |
|-----------------------------|------|
| Dias | Kc |
| 1 – 61 | 0,40 |
| 62 – 153 | 0,75 |
| 154 – 244 | 1,10 |
| 245 – 334 | 1,25 |
| 335 – 360 | 0,70 |

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

A aplicação dos tratamentos teve início aos 60 DAC, visando assegurar a rebrota e a estabilização do estande de plantas. Nesse período foram realizadas duas irrigações de 21 mm cada, aos 15 e 40 DAC. A lâmina de água recebida via precipitação pluviométrica foi considerada e subtraída no cálculo de cada evento de irrigação.

Por meio da Figura 1, pode-se constatar a variação dos valores de precipitação pluvial (P), evapotranspiração de referência (ETo), ETc e a lâmina bruta (LB) aplicada nos tratamentos correspondentes a 40, 60, 80, 100 e 120% da ETc.

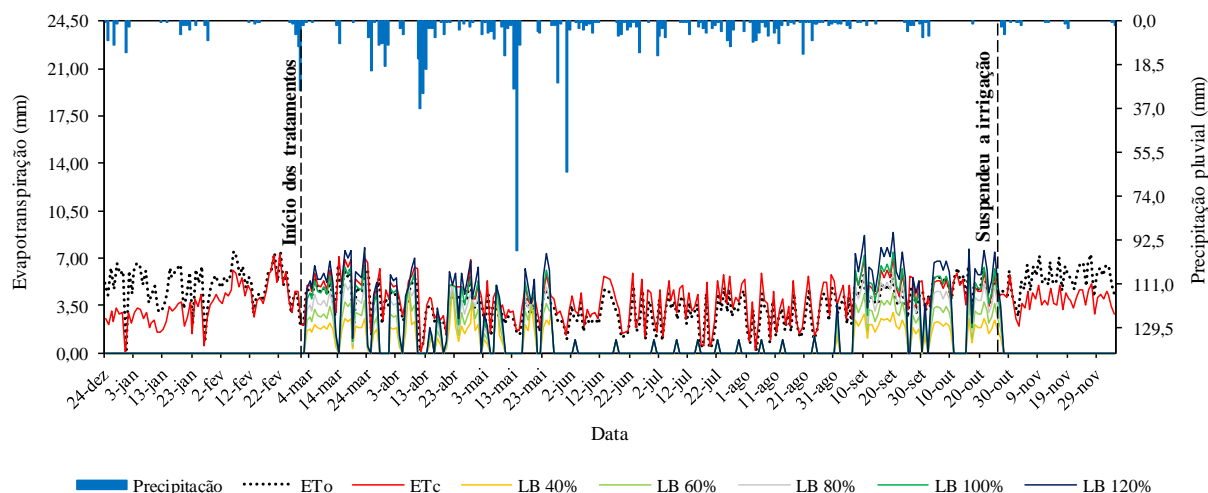


Figura 1. Valores de precipitação, evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração da cultura (ETc), e lâmina bruta aplicada nos tratamentos de 40% (LB 40%), 60% (LB 60%), 80% (LB 80%), 100% (LB 100%) e 120% (LB 120%) da ETc na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2021.

O acumulado de chuva durante o ciclo da cana soca foi de 895 mm ano^{-1} , no qual os maiores índices pluviométricos foram nos meses de março a agosto, somando 764 mm, correspondente a 85,4% do acumulado para todo o ciclo, sendo o mês de maio o mais chuvoso, com acumulado de 282 mm. A ETo acumulada ao longo do ciclo da cultura foi de 1.398 mm, com média de $4,03 \text{ mm dia}^{-1}$, já a ETc acumulada foi de $1.363 \text{ mm ano}^{-1}$, com valor médio de $3,93 \text{ mm dia}^{-1}$. As lâminas de irrigação aplicadas de forma pulsada e contínua durante o ciclo da cana soca nos tratamentos correspondente a 40, 60, 80, 100 e 120% da ETc, foram de 204, 306, 408, 510 e 612 mm, respectivamente.

Aos 310 DAC foi interrompida a irrigação promovendo um estresse hídrico na cultura, com o propósito de intensificar o acúmulo de açúcares até o momento da colheita e induzir a maturação e a concentração do açúcar, pois segundo Doorenbos & Kassam (1994) durante o período de maturação a cana-de-açúcar necessita de baixo teor de água no solo. Após esse período, aos 352 DAC realizou-se a colheita da cana-de-açúcar.

As medidas das trocas gasosas na cana-de-açúcar foram realizadas 180 e 315 dias após o corte (DAC), em duas plantas por parcela, escolhidas de forma aleatória, no terço médio da folha +3, que corresponde à terceira folha da haste ou barbela da bainha visível conhecida como folha TVD (Top Visible Dewlap), considerada a folha fisiologicamente madura e não sombreada (Malavolta et al., 1997).

Para as leituras, utilizou-se um Analisador Portátil de Gás Infravermelho (Infra-Red Gas Analyzer – IRGA) modelo Li 6400 XT (LI COR). Os dados foram coletados entre as 11 e 13

horas, horário de brilho do sol intenso e elevada demanda evapotranspiratória, em sistema aberto com a câmara foliar ajustada para densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos, de $1800 \pm 2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, aproximadamente, temperatura ambiente e concentração de CO_2 capsular.

Nas ocasiões, foram mensuradas a fotossíntese líquida (A), em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; a condutância estomática (g_s), em $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; a transpiração (E), em $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; a concentração interna de CO_2 (C_i) em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, a temperatura foliar (T_f) em $^\circ\text{C}$; a eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s), em $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, a qual foi obtida pela relação entre a fotossíntese líquida e a condutância estomática; a eficiência instantânea de uso da água (A/E), em $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, dada pela relação entre a fotossíntese líquida e a transpiração e a eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i), em $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, que relacionou a fotossíntese líquida com concentração interna de CO_2 .

A área foliar (AF) da planta foi determinada aos 180 e 352 DAC, em 10 plantas aleatórias por parcela. Para o cálculo, utilizou-se o comprimento e a largura na porção mediana da folha +3, e o número de folhas verdes (folha totalmente expandida com o mínimo de 20% de área verde, contada a partir da folha +1), segundo metodologia descrita por Hermann e Câmara (1999), conforme a equação abaixo:

$$AF = C \times L \times 0,75 \times (N + 2) \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

AF = Área foliar, m^2 ;

C = Comprimento da folha, m;

L = Largura da folha, m;

0,75 = Fator de correção para área foliar da cultura, adimensional

2 = Fator de ajuste referente às folhas que não estão completamente expandidas, adimensional;

NFV = Número de folhas verdes, unidade.

Por ocasião da colheita, realizada aos 352 DAC, foram coletadas 10 plantas de forma aleatória, na área útil de cada parcela experimental, as quais foram divididas em colmo e parte aérea (folhas + ponteiros) que, posteriormente foram pesadas em balança digital para a obtenção da biomassa fresca da parte aérea (BFPA) e biomassa fresca dos colmos (BFC), por plantas. O número de plantas por parcela foi contabilizado e utilizado para a extrapolação do peso da BFPA e da BFC para Mg ha^{-1} .

Em posse dos dados, procedeu-se um teste normalidade, homocedasticidade, seguida de uma análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$). Quando constatado efeito

significativo dos fatores, as lâminas de irrigação (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc), foram comparadas por meio de análise de regressão polinomial ($p < 0,05$), e os tipo de aplicação da irrigação (por pulsos e contínua) foram comparados mediante teste de médias de Tukey ($p < 0,05$). Estas análises foram realizadas utilizando-se o software estatístico SISVAR (Ferreira, 2019). A escolha dos modelos de regressão foi baseada no efeito não significativo do desvio de regressão, na significância dos parâmetros da equação de ajuste ($p < 0,05$), no maior valor de coeficiente de determinação (R^2) e na explicação biológica para cada variável em função dos tratamentos avaliados.

Para identificar os padrões e o efeito dos tratamentos sobre as trocas gasosas e o rendimento de biomassa nas plantas de cana-de-açúcar, realizou-se uma análise de componente principal (Principal Component Analysis – PCA). A PCA é um método de estatística multivariada utilizada para reduzir grandes conjuntos de dados em conjuntos de dados menores sem que haja perda dos dados da amostra original, e ainda contabilizar a máxima variância das variáveis estudadas (Jardim et al., 2021a). Os componentes principais (PC) foram selecionados com base no critério de Kaiser, que considera apenas autovalores maiores que 1 para utilização da PC (Kaiser, 1960; Jardim et al., 2021b). Além disso, antes da realização da PCA os dados foram padronizados, aplicando média igual a 0 e desvio-padrão igual a 1. Todas as análises foram realizadas utilizando o software R (R Core Team, 2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

É possível constatar que as lâminas de irrigação e o tipo de aplicação da irrigação na cultura da cana-de-açúcar, afetaram de forma isolada a fotossíntese líquida (A) e a condutância estomática (gs) nas duas épocas de leitura (180 e 315 DAC), e a transpiração (E) apenas aos 315 DAC; para a E aos 180 DAC e a C_i aos 180 e 315 DAC, houve efeito significativo apenas das lâminas de irrigação; e a temperatura foliar (T_f) não variou significativamente em função dos tratamentos em nenhuma das datas avaliadas (Tabela 3).

Tabela 3. Fotossíntese líquida (*A*), transpiração (*E*), condutância estomática (*gs*), concentração interna de CO₂ (*Ci*) e temperatura foliar (*Tf*) aos 180 e 315 DAC, em cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua

| Lâminas de Irrigação (% ETc) | | | | | Equação | R ² | CV (%) | Tipos de Aplicação | |
|--|----|----|-----|-----|--|----------------|--------|--------------------|-----------------------------|
| 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | | | | Pulsado | Contínuo |
| A (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹) – Leitura aos 180 DAC ¹ (L: p ≤ 0,01; TA: p ≤ 0,01; L x TA: p > 0,05; CV = 15,9%) | | | | | $A = -0,002^{**}ETc^2 + 0,3659^{**}ETc + 0,9925$ | 0,92 | 20,3 | 17,3 a | 14,3 b |
| A (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹) – Leitura aos 315 DAC ¹ (L: p ≤ 0,01; TA: p ≤ 0,01; L x TA: p > 0,05; CV = 19,4%) | | | | | $A = -0,0033^{**}ETc^2 + 0,5377^{**}ETc - 3,1574$ | 0,97 | 23,6 | 17,9 a | 14,9 b |
| E (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) – Leitura aos 180 DAC ¹ (L: p ≤ 0,05; TA: p > 0,05; L x TA: p > 0,05; CV = 18,2%) | | | | | $E = -0,0004^{**}ETc^2 + 0,0696^{**}ETc + 0,3657$ | 0,90 | 19,9 | | ns |
| E (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) – Leitura aos 315 DAC ¹ (L: p ≤ 0,05; TA: p ≤ 0,01; L x TA: p > 0,05; CV = 19,8%) | | | | | $E = -0,0007^{**}ETc^2 + 0,1227^{**}ETc + 0,5039$ | 0,96 | 22,0 | 5,8 a | 4,9 b |
| gs (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) – Leitura aos 180 DAC ¹ (L: p ≤ 0,05; TA: p ≤ 0,01; L x TA: p > 0,05; CV = 17,8%) | | | | | $gs = -2E-05^{**}ETc^2 + 0,0031^{**}ETc + 0,0785$ | 0,98 | 10,3 | 0,20 a | 0,18 b |
| gs (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) – Leitura aos 315 DAC ¹ (L: p ≤ 0,01; TA: p ≤ 0,01; L x TA: p > 0,05; CV = 13,1%) | | | | | $gs = -4E-05^{**}ETc^2 + 0,0061^{**}ETc - 0,0404$ | 0,95 | 23,9 | 0,22 a | 0,16 b |
| Ci (μmol mol ⁻¹) – Leitura aos 180 DAC ¹ (L: p ≤ 0,05; TA: p > 0,05; L x TA: p > 0,05; CV = 29,8%) | | | | | $Ci = -0,0232^{*}ETc^2 + 4,1104^{**}ETc - 34,327$ | 0,93 | 31,7 | | ns |
| Ci (μmol mol ⁻¹) – Leitura aos 315 DAC ¹ (L: p ≤ 0,05; TA: p ≤ 0,01; L x TA: p > 0,05; CV = 15,9%) | | | | | $Ci = -0,0223^{**}ETc^2 + 3,8698^{**}ETc - 32,894$ | 0,98 | 23,8 | | ns |
| Tf (°C) – Leitura aos 180 DAC ¹ (L: p > 0,05; TA: p > 0,05; L x TA: p > 0,05; CV = 16,8%) | | | | | | | | | $\bar{y} = 35,8 \text{ °C}$ |
| Tf (°C) – Leitura aos 315 DAC ¹ (L: p > 0,05; TA: p > 0,05; L x TA: p > 0,05; CV = 12,6%) | | | | | | | | | $\bar{y} = 41,9 \text{ °C}$ |

¹ - Resumo da análise de variância (ANOVA); L - Lâminas de irrigação (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc); TA - Tipos de aplicação (pulsado e contínuo); ETc - Evapotranspiração da cultura; DAC - Dias pós o corte; CV - Coeficiente de variação; ns, ** e * - Não significativo, significativo a p ≤ 0,01 e 0,05, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes na linha indicam diferença significativa (p ≤ 0,05) pelo teste de Tukey para os tipos de irrigação pulsada e contínua.

Aos 180 DAC, a *A* apresentou valor máximo de $17,7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na lâmina de irrigação correspondente a 91,5% da *ETc* (Tabela 3), revelando um incremento de 42,7% sobre o maior nível de estresse hídrico aplicado na cana-de-açúcar (40% da *ETc*), cujo valor obtido foi de $12,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Quanto a segunda época de leitura (315 DAC), a lâmina de irrigação correspondente a 81,5% da *ETc* proporcionou uma *A* de $18,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, com incremento de 43,5% sobre a lâmina de 40% da *ETc* (Tabela 3). Analisando o tipo de aplicação da irrigação pode-se constatar que, tanto aos 180 quanto aos 315 DAC a irrigação pulsada favoreceu a *A*, com incrementos de 21 e 20,1%, respectivamente, quando comparado com o tipo de aplicação da irrigação de forma contínua (Tabela 3).

Estes resultados ressaltam os efeitos deletérios do déficit hídrico no processo fotossintético das plantas. Estudando os efeitos do déficit hídrico sobre a fotossíntese líquida em cana-de-açúcar, Endres et al. (2019) obtiveram reduções de 61% na taxa fotossintética durante o estágio de crescimento intenso das plantas. Quando a disponibilidade de água no solo é reduzida, as plantas realizam o fechamento estomático para reduzir a perda de água para a atmosfera, porém, esse processo limita também a absorção de CO_2 que resulta em redução da taxa fotossintética pela escassez de substrato que suporte a atividade fotossintética (Hoang et al., 2019).

Assim como neste estudo, outros autores também constataram redução da fotossíntese na cana-de-açúcar sob condições de restrição hídrica (Khonghintaisong et al., 2018; Endres et al., 2019; Hoang et al., 2019; Garcia et al., 2020; Misra et al., 2020; Ogbaga et al., 2020). Sob irrigação plena, Lira et al. (2018) estudando as trocas gasosas da cultivar RB92579 sob cultivo irrigado com águas salobras, obtiveram taxa fotossintética máxima de $17,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aos 140 dias após o plantio (DAP), no tratamento com água de boa qualidade.

Quanto ao efeito da irrigação pulsada, é possível observar que essa técnica favoreceu a manutenção da fotossíntese na cana-de-açúcar, fato que pode estar associado a manutenção da umidade do solo ao longo do tempo devido aos eventos curtos e frequentes de molhamento. Puértolas et al. (2020), estudando a cultura do manjeriço e do tomate, constataram que a irrigação de alta frequência alterou a distribuição da umidade no perfil do solo, também o estado hídrico e hormonal, o crescimento diário e as trocas gasosas das plantas.

A maior *E* pela cana-de-açúcar, na primeira época de leitura (180 DAC), foi obtida quando a reposição hídrica foi equivalente a 87% da *ETc*, com valor de $3,4 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, correspondendo a um acréscimo percentual de 36% em relação ao valor obtido na reposição de 40% da *ETc* ($2,5 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Tabela 3). Aos 315 DAC, a *E* máxima foi $5,9 \text{ mmol H}_2\text{O}$

$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, na lâmina correspondente a 87,6% da ET_c , incrementando em 37,2% esta variável em relação ao valor de $4,3 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ obtido na reposição de 40% da ET_c . Para essa mesma época de leitura, a irrigação por pulsos proporcionou incremento de 18,4% para a E , em relação a irrigação contínua (Tabela 3).

Assim como constatado para a A , a E também reduziu com a intensificação do déficit hídrico, provavelmente devido ao mecanismo de fechamento estomático que reduz a perda de água por transpiração. Inicialmente, o fechamento estomático pode ser vantajoso pois responde rapidamente contra a perda excessiva de água evitando a desidratação foliar; porém, quando se prolonga torna-se ineficiente, pois acaba interferindo no fluxo difusivo de CO_2 , o que posteriormente interrompe os processos de divisão e alongamento celular, comprometendo o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Inman-Bamber e Smith, 2005; Inman-Bamber et al., 2012; Dlamini, 2021).

Lira et al. (2018) obtiveram valores de transpiração para cana-de-açúcar (RB92579) aos 140 e 320 dias após o plantio de 6,3 e $3 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Os autores associaram a redução da E aos 320 DAP, com a redução das atividades fotossintéticas devido ao final do ciclo fenológico da cultura. No presente estudo, houve um aumento da E aos 315 DAC, o que pode estar relacionado à capacidade da cultivar RB041443 manter suas atividades fotossintéticas por um período mais longo, quando em condição de suprimento hídrico ideal. A irrigação pulsada associada ao gotejamento subsuperficial, pode contribuir para a manutenção da E na cana-de-açúcar, o que pode ter relação com a disponibilidade de água com maior constância na zona rizosférica das plantas.

O aumento do déficit hídrico reduziu a g_s na cana-de-açúcar nas duas épocas de leitura (Tabela 3). Aos 180 DAC, repondo 77,5% da água evapotranspirada pela cultura, obteve-se o maior valor para g_s , que foi de $0,20 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$, já aos 315 DAC, o máximo valor obtido para a variável foi de $0,27 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$, na lâmina correspondente a 76,3% da ET_c . Para ambas datas de leitura (180 e 315 DAC), a g_s foi maior em 11,1 e 37,5% respectivamente, quando a irrigação foi aplicada por pulsos (Tabela 3).

A tendência da g_s assemelha-se aquela observada na A e a E , cuja reduções na lâmina de irrigação e, conseqüentemente, reduções na disponibilidade hídrica, reduziu a g_s nas plantas de cana-de-açúcar. Inman-Bamber e Smith (2005) afirmam que a redução da condutância estomática é uma importante estratégia da cana-de-açúcar para evitar a desidratação das folhas. Analisando os resultados para a A , E e g_s , nota-se uma íntima relação entre elas quando o estresse hídrico é intensificado, o que provavelmente tem relação com o fechamento estomático e a limitação dessas

variáveis. De acordo com Dlamini (2021), a disponibilidade de água para as plantas é um dos fatores fundamentais e responsáveis pelo processo de regulação da abertura ou fechamento dos estômatos.

Estudando a cultura da cana-de-açúcar (RB92579) sob suprimento hídrico ótimo, Lira et al. (2018) obtiveram valores de 0,20 e 0,13 mol H₂O m⁻² s⁻¹ aos 140 e 320 DAP, respectivamente. O maior valor para *g_s* obtido aos 315 DAC pode ter relação com o maior desempenho fotossintético dessa cultivar ao longo do ciclo produtivo. A esse respeito, Taiz et al. (2017) relatam que taxas mais altas de condutância estomática, transpiração e fotossíntese levam a um aumento significativo na produção das culturas. A irrigação pulsada também contribuiu para a manutenção da *g_s* na cana-de-açúcar, ressaltando os possíveis benefícios da técnica de irrigação sobre essa variável. Stallmann et al. (2020), afirmam que a frequência dos eventos de irrigação modifica o crescimento das plantas e pode contribuir para maiores rendimentos.

A *C_i* variou em função das lâminas de irrigação nas duas épocas de leitura (Tabela 3). Aos 180 DAC, a *C_i* máxima foi de 147,7 μmol mol⁻¹, na lâmina de irrigação correspondente a 88,6% da ET_c, com incremento de 59% sobre a reposição de 40% da ET_c (92,9 μmol mol⁻¹). Já aos 315 DAC, o máximo valor obtido para *C_i* foi de 135 μmol mol⁻¹, na lâmina de 86,8% da ET_c, incrementando em 56,6% e valor da variável quando comparada a lâmina de 40% da ET_c, cujo valor obtido foi de 86,2 μmol mol⁻¹. Assim como o déficit hídrico reduziu a *g_s*, era esperado que houvesse redução também na *C_i* em função do aumento do estresse hídrico.

Godoi Neto (2018), estudando a cana-de-açúcar (RB92579) irrigada com águas salobras, obteve, no tratamento com água de boa qualidade, o valor de 224 μmol mol⁻¹ para a concentração interna de CO₂, valor superior aos obtidos no presente estudo. De acordo com Taiz et al. (2017) baixos valores de *C_i* é sinal de elevado fluxo do processo fotossintético, sendo, portanto, o carbono reduzido a compostos orgânicos, corroborando com os altos valores de fotossíntese apresentados anteriormente.

As lâminas de irrigação e os tipos de aplicação da irrigação afetaram, de forma isolada, a área foliar (*AF*) aos 180 e 315 DAC, a biomassa fresca da parte aérea (*BFPA*) e a biomassa fresca dos colmos (*BFC*) aos 315 DAC; a eficiência instantânea do uso da água (*A/E*) e a eficiência intrínseca do uso da água (*A/g_s*) apenas aos 180 DAC; a eficiência instantânea de carboxilação (*A/C_i*) aos 315 DAC. Para a eficiência instantânea do uso da água (*A/E*) aos 315 DAC, houve influência apenas das lâminas de irrigação; a eficiência intrínseca do uso da água (*A/g_s*) aos 315 DAC e a eficiência instantânea de carboxilação (*A/C_i*) aos 180 DAC não foram afetadas pelos tratamentos avaliados (Tabela 4).

Tabela 4. Eficiência instantânea do uso da água (*A/E*), eficiência intrínseca do uso da água (*A/g_s*), eficiência instantânea de carboxilação (*A/C_i*), área foliar (*AF*), biomassa fresca da parte aérea (*BFPA*) e biomassa fresca dos colmos (*BFC*) aos 180 e 315 DAC, em cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua

| Lâminas de Irrigação (% ETc) | | | | | Tipos de Aplicação | | | | |
|---|----|----|-----|-----|--|----------------|--------|---------|----------|
| 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | Equação | R ² | CV (%) | Pulsado | Contínuo |
| <i>A/E</i> (μmol CO ₂ /mmol H ₂ O ⁻¹) – Leitura aos 180 DAC ¹ (L: p ≤ 0,05; TA: p ≤ 0,05; L x TA: p > 0,05; CV = 23,4%) | | | | | $A/E = -0,0009^{**}ETc^2 + 0,1398^{**}ETc + 0,2664$ | 0,95 | 26,1 | 5,4 a | 4,6 b |
| <i>A/E</i> (μmol CO ₂ /mmol H ₂ O ⁻¹) – Leitura aos 315 DAC ¹ (L: p ≤ 0,05; TA: p > 0,05; L x TA: p > 0,05; CV = 20,3%) | | | | | $A/E = -0,0005^{**}ETc^2 + 0,079^{**}ETc + 0,2997$ | 0,91 | 21,6 | ns | |
| <i>A/g_s</i> (μmol CO ₂ /mmol H ₂ O ⁻¹) – Leitura aos 180 DAC ¹ (L: p ≤ 0,01; TA: p ≤ 0,01; L x TA: p > 0,05; CV = 15,8%) | | | | | $A/g_s = -0,0084^{**}ETc^2 + 1,5166^{**}ETc + 20,138$ | 0,89 | 17,9 | 87,5 a | 74,7 b |
| <i>A/g_s</i> (μmol CO ₂ /mmol H ₂ O ⁻¹) – Leitura aos 315 DAC ¹ (L: p > 0,05; TA: p > 0,05; L x TA: p > 0,05; CV = 24,5%) | | | | | $\bar{y} = 89,2 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$ | | | | |
| <i>A/C_i</i> (mol m ⁻² s ⁻¹) – Leitura aos 180 DAC ¹ (L: p > 0,05; TA: p > 0,05; L x TA: p > 0,05; CV = 46,2%) | | | | | $\bar{y} = 0,25 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ | | | | |
| <i>A/C_i</i> (mol m ⁻² s ⁻¹) – Leitura aos 315 DAC ¹ (L: p ≤ 0,05; TA: p ≤ 0,05; L x TA: p > 0,05; CV = 20,4%) | | | | | $A/C_i = -2E-05^{**}ETc^2 + 0,0039^{**}ETc + 0,0236$ | 0,98 | 22,3 | 0,17 a | 0,14 b |
| <i>AF</i> (m ²) – Medida aos 180 DAC ¹ (L: p ≤ 0,01; TA: p ≤ 0,01; L x TA: p > 0,05; CV = 18,5%) | | | | | $AF = -4E-05^{**}ETc^2 + 0,0075^{**}ETc - 0,005$ | 0,88 | 26,1 | 0,35 a | 0,26 b |
| <i>AF</i> (m ²) – Medida aos 315 DAC ¹ (L: p ≤ 0,01; TA: p ≤ 0,05; L x TA: p > 0,05; CV = 24,7%) | | | | | $AF = -5E-05^{**}ETc^2 + 0,009^{**}ETc - 0,0814$ | 0,93 | 29,2 | 0,32 a | 0,23 b |
| <i>BFPA</i> (Mg ha ⁻¹) – Colheita aos 315 DAC ¹ (L: p ≤ 0,01; TA: p ≤ 0,01; L x TA: p > 0,05; CV = 29,3%) | | | | | $BFPA = -0,0009^{**}ETc^2 + 0,1646^{**}ETc + 4,0481$ | 0,95 | 18,3 | 12,3 a | 9,3 b |
| <i>BFC</i> (Mg ha ⁻¹) – Colheita aos 315 DAC ¹ (L: p ≤ 0,01; TA: p ≤ 0,01; L x TA: p > 0,05; CV = 18,0%) | | | | | $BFC = -0,0104^{**}ETc^2 + 2,1439^{**}ETc + 44,411$ | 0,94 | 14,0 | 147,4 a | 135,0 b |

¹ - Resumo da análise de variância (ANOVA); L - Lâminas de irrigação (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc); TA - Tipos de aplicação (pulsado e contínuo); ETc - Evapotranspiração da cultura; DAC - Dias pós o corte; CV - Coeficiente de variação; ns, ** e * - Não significativo, significativo a p ≤ 0,01 e 0,05, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes na linha indicam diferença significativa (p ≤ 0,05) pelo teste de Tukey para os tipos de irrigação pulsada e contínua.

O maior valor obtido para a A/E , aos 180 DAC, foi de $5,7 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, na lâmina de irrigação correspondente a 77,7% da ET_c . Aos 315 DAC, a lâmina de irrigação de máxima eficiência física foi de 79%, cujo valor obtido para a A/E foi de $3,4 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$ (Tabela 4). Considerando a menor reposição hídrica avaliada (40% da ET_c), que corresponde ao maior déficit hídrico aplicado nas plantas de cana-de-açúcar, o aumento da lâmina de irrigação até o ponto de máxima eficiência proporcionou incrementos de 29,5 e 29% aos 180 e 315 DAC, com A/E de 4,4 e $2,7 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, respectivamente. A irrigação pulsada proporcionou incremento de 17,4% na A/E quando comparada com a irrigação contínua, aos 180 DAC (Tabela 4).

A intensificação do estresse hídrico limita a A/E devido ao comprometimento da assimilação de CO_2 , no entanto, em condições de déficit hídrico moderado a A/E pode ser favorecida. Stallmann et al. (2020), associam esse efeito ao fato da redução na condutância estomática restringir a perda de água por transpiração mais cedo e de forma mais eficaz quando comparado com a redução da fotossíntese. Tal afirmação pode sustentar os resultados desse estudo, cuja a lâmina de máxima eficiência para as duas épocas de leituras (180 e 315 DAC) foi aproximadamente 20% inferior a real demanda hídrica da cultura (100% da ET_c).

Em seu estudo, Godoi Neto (2018) obteve valores de A/E de $3,5 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, aos 210 DAP. Gonçalves et al. (2017), para a cultivar RB867515 irrigada com água de abastecimento público por gotejamento subsuperficial a 20 cm de profundidade no solo, obtiveram valores de A/E de 3,5 e de $4,2 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, aos 169 e 260 DAC, respectivamente. Segundo Larcher (2000), a melhor relação entre absorção de CO_2 e consumo de H_2O ocorre quando os estômatos estão parcialmente fechados, nesse momento os dois processos de difusão são prontamente reduzidos, fazendo com que a A/E alcance valores mais altos.

Benefícios da irrigação pulsada sobre a eficiência do uso da água também foram constatados em outros estudos, como na cultura da soja, na qual a irrigação com 4 pulsos diários, apresentou os maiores valores de eficiência do uso da água quando comparado com a irrigação contínua (Eid et al., 2013); e na cultura da batata, onde houve aumento na eficiência do uso da água, com valor máximo obtido na lâmina correspondente a 75% da ET_c aplicando 4 pulsos de irrigação (Bakeer et al., 2009).

A leitura realizada aos 180 DAC indicou que a A/g_s reduziu com o aumento do déficit hídrico (Tabela 4), apresentando valor máximo de $88,6 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, na lâmina de irrigação correspondente a 90,3% da ET_c , revelando incremento de 31,5% em relação a lâmina

de 40% da ETc, cujo valor da A/g_s foi de $67,4 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$. Sob condição de irrigação pulsada, a A/g_s aumentou em 17,1%, quando comparada com a irrigação contínua (Tabela 4). A redução da A/g_s pode estar relacionada a maior redução da A em relação a g_s (Tabela 3). Godoi Neto (2018) obteve valores de A/g_s para a cana-de-açúcar irrigada de $100,9 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, aos 150 DAC. A irrigação pulsada também favoreceu o aumento da A/g_s , possivelmente devido a mitigação dos efeitos deletérios do déficit hídrico, tanto na A quanto na g_s das plantas de cana-de-açúcar.

Para a segunda época de leitura (315 DAC), a variável A/C_i apresentou valor máximo de $0,21 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na reposição hídrica de 97,5% da ETc, com incremento de 40% sobre a lâmina de 40% da ETc ($0,15 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Tabela 4). Para essa variável, houve incremento de 21,4% quando a irrigação realizada foi do tipo por pulsos (Tabela 4). A redução na A/C_i também pode estar associada as maiores reduções causadas na A em função do aumento do déficit hídrico, porém as reduções na C_i , associadas a redução da g_s , podem favorecer a manutenção das atividades bioquímicas. Gonçalves et al. (2017), obtiveram valor para a A/C_i de $0,18 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aos 241 DAC.

A manutenção da umidade do solo por mais tempo ao longo do dia, pode favorecer as atividades fotossintéticas das plantas, no caso da irrigação pulsada com as fases de molhamento e repouso na distribuição de água, pode contribuir de forma mais significativa para a sinalização do controle estomático pelas plantas e beneficiar os processos metabólicos que antecedem a produção de biomassa vegetal. Puértolas et al. (2020), associam o aumento da eficiência do uso da água em manjerição, com a distribuição heterogênea da umidade no perfil do solo devido à alta frequência de irrigação. Os autores afirmam ainda que, plantas submetidas a condições de umidade heterogênea no perfil do solo respondem fisiologicamente diferente daquelas em condição de umidade homogênea.

Com relação à AF da cana-de-açúcar (Tabela 4), aos 180 DAC o valor máximo obtido foi de $0,35 \text{ m}^{-2}$, na lâmina de irrigação correspondente a 93,8% da ETc, revelando incremento de 52,2% em relação a lâmina de 40% da ETc, que proporcionou AF de $0,23 \text{ m}^{-2}$. Para a segunda época de leitura, aos 315 DAC, a AF máxima foi de $0,33 \text{ m}^{-2}$, obtida na lâmina de irrigação correspondente a 90% da ETc, cujo incremento obtido sobre o menor volume de reposição hídrica avaliado (40% da ETc) foi de 65% que apresentou $0,20 \text{ m}^{-2}$ de AF . Quando a irrigação foi realizada por pulsos, a AF das plantas de cana-de-açúcar, foi incrementada em 34,6 e 39,1% em relação à irrigação contínua, aos 180 e 315 DAC, respectivamente (Tabela 4).

As plantas em condição de limitação hídrica tendem a reduzir a sua área foliar devido mudanças metabólicas realizadas como mecanismo para reduzir as perdas de água para a atmosfera. Estudos anteriores com cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico, verificaram redução da área foliar das plantas em consequência da redução da taxa fotossintética (Inman-Bamber et al., 2012; Gonçalves et al., 2017; Ferreira et al., 2017; Hoang et al., 2019 e Dingre e Gorantiwar, 2021)

O maior valor para a *AF* aos 180 DAC tem relação com estágio de crescimento intensivo das plantas, com tendência a redução quando a cultura entra na fase de maturação, assim como observado no presente estudo. Dingre e Gorantiwar (2021) observaram maior *AF* durante o estágio de crescimento intenso da cana-de-açúcar, e associam esse resultado, principalmente, ao rápido crescimento vegetativo dos perfilhos como um caráter típico da cana-de-açúcar entre os 75 e 195 dias após a brotação. Gonçalves et al. (2017) obtiveram valores de área foliar de 0,40 e 0,50 m² aos 171 e 281 DAC para a variedade de cana-de-açúcar RB867515, superior aos encontrados no presente estudo, fato que pode estar relacionado a diferença de cultivar ou mesmo a densidade de plantas por metro linear.

Os incrementos obtidos com a irrigação pulsada sobre a *AF*, nas duas épocas de leitura, estão associados às melhorias obtidas nas trocas gasosas das plantas de cana-de-açúcar, descritas anteriormente. Melhores condições de umidade de solo favorece a realização das atividades fotossintéticas e, conseqüentemente, beneficia o desenvolvimento vegetativo e a produção de massa vegetal pela cana-de-açúcar. Segundo Blum (2005), a manutenção da área foliar é considerada uma característica importante para sustentar o potencial de rendimento das culturas.

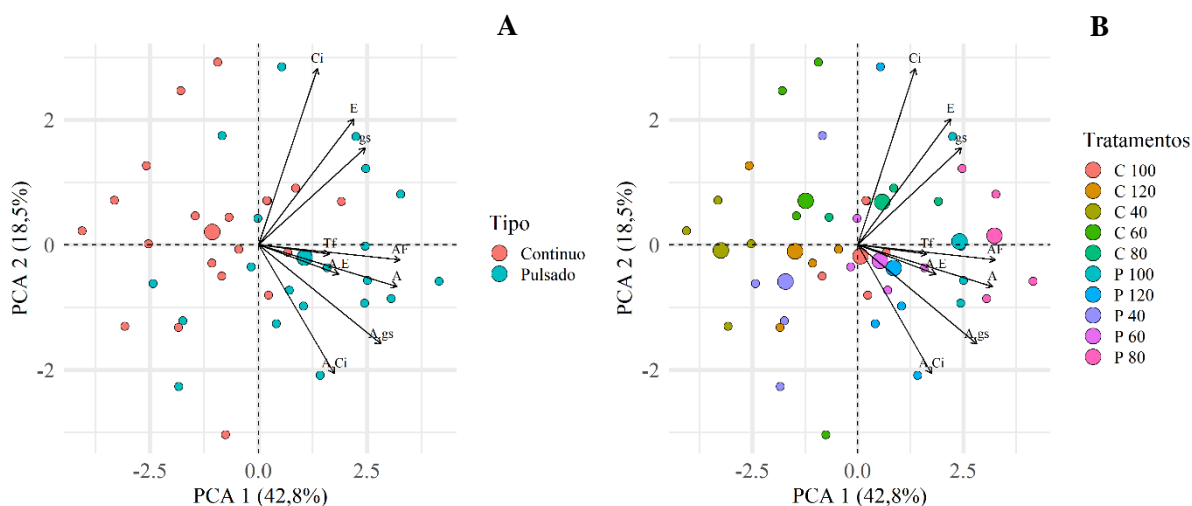
A produção de biomassa da cana-de-açúcar reduziu com o aumento do déficit hídrico em função da redução das lâminas de irrigação aplicadas (Tabela 4). O máximo valor para a *BFPA* foi de 11,6 Mg ha⁻¹, na lâmina de irrigação correspondente a 91,4% da *ETc*, resultando em aumento percentual de 26,1 sobre a lâmina de 40% da *ETc*, cujo valor para a *BFPA* foi de 9,2 Mg ha⁻¹. Para a variável *BFC*, a lâmina de máxima eficiência foi de 103,1%, onde proporcionou uma produção de 154,9 Mg ha⁻¹, resultando em incremento de 36,5 % sobre a lâmina de 40% da *ETc*, cuja produção de *BFC* foi de 113,5 Mg ha⁻¹. Para as variáveis de produção *BFPA* e *BFC*, a irrigação realizada por pulsos incrementou em 32,3 e 9,2% respectivamente, quando comparada com a irrigação aplicada de forma contínua (Tabela 4).

Considerando os efeitos deletérios observados nas variáveis fisiológicas da cana-de-açúcar com a intensificação do déficit hídrico, as reduções no rendimento da *BFPA* e na *BFC*

eram esperadas. De acordo com Hoang et al. (2019), a redução da relação fonte/dreno, ou seja, a fotossíntese seguida pelo crescimento do tecido vegetativo, leva ao declínio do acúmulo de biomassa vegetal. Estudos anteriores também apontam os efeitos deletérios sobre a produção de biomassa fresca dos colmos em cana-de-açúcar sob déficit hídrico (Santos et al., 2019; Garcia et al., 2020; Misra et al., 2020). Moraes et al. (2022) obtiveram para a cana-de-açúcar (RB92579) produção de biomassa fresca dos colmos de 168,97 Mg ha⁻¹ sob irrigação plena. Magalhães et al. (2018) obtiveram 158,5 Mg ha⁻¹ de biomassa dos colmos frescos, para a variedade RB867515, repondo 100% da ETc.

Uma vez que, os parâmetros fisiológicos analisados no presente estudo foram beneficiados pela técnica da irrigação por pulsos, podem-se associar os incrementos na produção de biomassa fresca da cana-de-açúcar ao fato dessa técnica poder contribuir para mitigar os efeitos deletérios do estresse hídrico na cultura. A irrigação por pulsos pode proporcionar melhor distribuição da umidade ao longo do tempo e favorecer o desempenho produtivo da cana-de-açúcar. Efeitos benéficos da irrigação pulsada foram constatados sobre a produção de algumas culturas como o coentro (Zamora et al., 2021), o feijão vagem (Almeida et al., 2018), o amendoim (Cruz et al., 2021) e a berinjela (Arriero et al., 2020).

Por meio da Figura 2 é possível observar a análise de componentes principais (PCA) das trocas gasosas da cana-de-açúcar em função do efeito dos tipos de aplicação, na primeira época de análise (180 DAC). A variância acumulativa para a PC1 e a PC2, aos 180 DAC, foi de 61,25% (Figura 2).



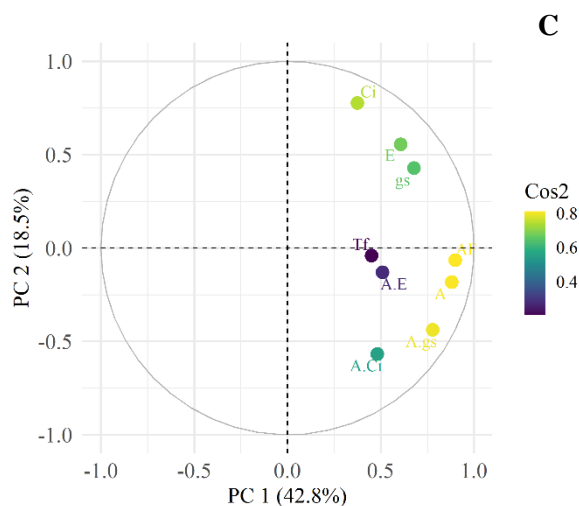


Figura 2. Análise de componentes principais (PCA) para as trocas gasosas da cana-de-açúcar aos 180 DAC, com destaque para o efeito dos tipos de aplicação (A) e do conjunto completo de tratamentos (B), seguido dos respectivos scores plot (C).

Constata-se um maior agrupamento das variáveis fisiológicas quando se utilizou a irrigação por pulso independente da lâmina de irrigação (Figura 2A). Analisando os tratamentos aplicados, observou-se um maior agrupamento das variáveis fisiológicas quando a reposição hídrica foi realizada com 80 e 100% da ETc de forma pulsada (P-80 e P-100) (Figura 2B).

Tais resultados evidenciam os benefícios da irrigação pulsada sobre as trocas gasosas da cana-de-açúcar, podendo ser utilizada como técnica auxiliar do manejo de irrigação para aumentar a eficiência da irrigação, bem como mitigar os efeitos deletérios de déficit hídrico. Inseridas na componente principal 1 (PC1), as variáveis *A*, *leaf area* (área foliar), *A/gs*, *gs* e *E* apresentaram cargas (scores) elevadas, variando de 0,61 a 0,90, em relação a componente principal 2 (PC2) apenas a *Ci* apresentou carga significativa, com valor de 0,78 (Figura 2C).

Com relação à análise realizada aos 315 DAC (Figura 3), o comportamento das variáveis fisiológicas e de rendimento da biomassa verde da cana-de-açúcar, foi similar a primeira época de análise (180 DAC). A PC1 explicou 39,77% da variabilidade dos dados, já a PC2 contribuiu com 20,04% da variância dos dados. Na Figura 3A, pode-se constatar o efeito dos tipos de aplicação da irrigação no agrupamento das variáveis, onde nota-se que a irrigação aplicada de forma pulsada agrupou maior parte das variáveis analisadas.

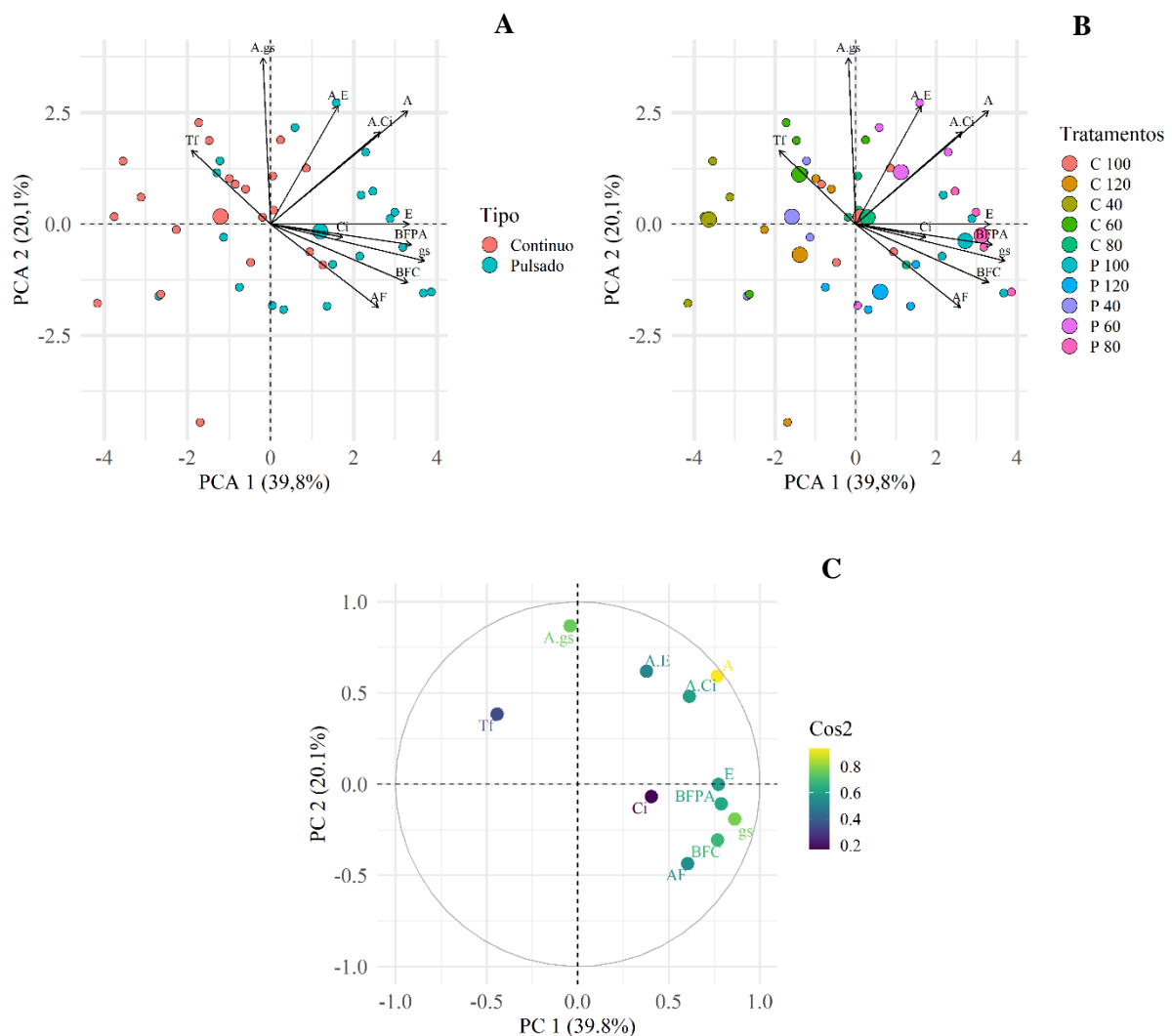


Figura 3. Análise de componente principal (PCA) para as trocas gasosas da cana-de-açúcar aos 315 DAC, com destaque para o efeito dos tipos de aplicação (A) e do conjunto completo de tratamentos (B), seguido dos respectivos scores plot (C).

Os tratamentos correspondentes a irrigação pulsada com lâminas equivalentes a 80 e 100% da ETc (P 80 e P100) agruparam-se com as variáveis de produção da biomassa fresca do colmo (BFC) e da parte aérea (BFPA), a área foliar (AF), a *gs*, a *Ci* e a *E* (Figura 3B). Para a A, a *A/Ci* e a *A/E*, além da irrigação com 80 e 100% da ETc aplicada de forma pulsada, a lâmina de 60% da ETc aplicada por pulsos (P 60), também contribuiu para o aumento dessas variáveis (Figura 3B). As variáveis BFC e BFPA apresentaram cargas de 0,77 e 0,79, respectivamente, sendo ambas inseridas na PC1. As variáveis *gs*, A, *E* e *A/Ci* também ficaram dentro da PC1, e apresentaram cargas variando de 0,61 a 0,86. Na PC2 a maior carga observada foi para a variável *A/gs* (0,87) (Figura 3C).

Desse modo, associam-se as melhorias obtidas nas trocas gasosas e na produção de biomassa verde com a aplicação da irrigação por pulsos, devido à redução dos efeitos deletérios do déficit hídrico, uma vez que a lâmina de irrigação correspondente a 80% da ETc aplicada por pulsos foi agrupada com boa parte das variáveis analisadas. De acordo com Endres et al. (2019), o agrupamento de variáveis como A , g_s e a produtividade da cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico, está relacionado com a uma maior resistência aos efeitos negativos desse estresse. Os autores relacionam essa resistência aos efeitos negativos do déficit hídrico, a adaptações morfológicas e fisiológicas desenvolvidas pelas plantas sob tais condições, como exemplo: o controle estomático para limitar a perda de água pelas plantas, e melhorias no desenvolvimento e no desempenho do sistema radicular das plantas. A esse respeito, Segal et al. (2006) observaram que a irrigação de alta frequência aumentou o teor de água no solo ao longo do tempo, proporcionando maior eficiência de absorção de água e nutrientes pelas raízes, e conseqüentemente, maior rendimento das plantas de girassol.

Por outro lado, é possível observar que as plantas que foram irrigadas de forma contínua apresentaram características associadas ao estresse por déficit hídrico, como o aumento da temperatura foliar, baixa transpiração e baixa condutância estomática (Figura 3B). Tais resultados também foram constatados por outros autores, onde o aumento da temperatura foliar, a redução da transpiração e na condutância estomática, bem como o aumento da eficiência do uso da água e de carboxilação foram associados a possíveis mecanismos desenvolvidos pelas plantas sob efeito de estresse por déficit hídrico (Endres et al., 2019; Garcia et al., 2020; Stallmann et al., 2020; Dingre e Gorantiwar, 2021; Dlamini, 2021).

4. CONCLUSÕES

O aumento do estresse hídrico reduziu as trocas gasosas, a área foliar e a produção de biomassa fresca da cana-de-açúcar.

A irrigação pulsada aumentou a fotossíntese, a eficiência do uso da água e a área foliar das plantas.

As produções de biomassa fresca da parte aérea e dos colmos foram maiores quando a irrigação foi realizada de forma pulsada.

A análise de componentes principais sugeriu a irrigação pulsada com 80% da evapotranspiração da cultura como o tratamento que proporcionou os melhores índices fisiológicos e de produção de biomassa verde na cana-de-açúcar.

5. REFERÊNCIAS

- Abd-elhakim, A. I. Soil conditioner effect on soil wetting patterns under pulsed drip irrigation system. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, v. 36, n. 2, p. 473-492, 2019. <https://doi.org/10.21608/mjae.2019.94653>
- Aguiar, A. T. E.; Gonçalves, C.; Paterniani, M. E. A. G. Z.; Tucci, M. L. S. A., Castro, C. E. F. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas - Boletim 200. 7ª Ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 2014. 452p. (Boletim IAC, nº 200).
- Almeida, W. F., Paz, V. P. S., Jesus, A. P. C., Silva, J. S., Gonçalves, K. S., Oliveira, A. S. Yield of green beans subjected to continuous and pulse drip irrigation with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 7, p. 476-481, 2018. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p476-481.
- Arriero, S. S.; Almeida, W. F.; Paz, V. P. S.; Damasceno, L. F. Yield of eggplant using low quality water and pulse drip irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 12, p. 822-826, 2020. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v24n12p822-826.
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; de Moraes Gonçalves, J. L.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Bakeer, G. A. A.; El-Ebabi, F. G.; El-Saidi, M. T.; Abdelghany, A. R. E. Effect of Pulse Drip Irrigation on Yield and Water Use Efficiency of Potato Crop Under Organic Agriculture in Sandy Soils. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, v. 26, n. 2, p. 736-765, 2009. <https://doi.org/10.21608/mjae.2009.109488>
- Blum, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*, v. 56, n. 11, p. 1159, 2005. <https://doi.org/10.1071/AR05069>
- Cavalcanti, F. L. A.; Santos, J. C. P.; Pereira, J. R.; Leite, J. P.; Silva, M. C. L.; Freire, F. J.; Silva, D. J.; Sousa, A. R.; Messias, A. S.; Faria, C. M. B.; Burgos, N.; Lima Júnior, M. A.; Gomes, R. V.; Cavalcanti, A. C.; Lima, J. F. V. F. Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco. 2ª aproximação. 3 ed. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco-IPA, 2008. 212 p.

- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar, Quarto Levantamento: Safra 2021/2022. CONAB, Brasília, Brasil, v. 8, n. 4, 2022.
- Cormier, J.; Depardieu, C.; Letourneau, G.; Boily, C.; Gallichand, J.; Caron, J. Tensiometer-based irrigation scheduling and water use efficiency of field-grown strawberries. *Agronomy Journal*, v. 112, n. 4, p. 2581-2597, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20205>
- Cruz, R. I. F.; Silva, G. F.; Silva, M. M.; Silva, A. H. S.; Santos Júnior, J. A.; Silva, Ê. F. D. F. E. Productivity of irrigated peanut plants under pulse and continuous dripping irrigation with brackish water. *Revista Caatinga*, v. 34, n. 1, p. 208-218, 2021. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n121rc>
- Dias, H. B.; Sentelhas, P. C. Dimensioning the Impact of Irrigation on Sugarcane Yield in Brazil. *Sugar Tech*, v. 21, n 1, p. 29-37, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0619-x>
- Daker, A. Irrigação e drenagem: A água na agricultura. 6 ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1984.
- Dingre, S. K.; Gorantiwar, S. D. Soil moisture based deficit irrigation management for sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in semiarid environment. *Agricultural Water Management*, v. 245, n. 9, p. 106549, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106549>
- Doorenbos, J.; Kassan, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33), 1994. 306p.
- Doorenbos, J. Y; Pruitt, W. O. Crop water requirements. FAO Estudio de Riego y Drenaje, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, n. 24, 1977. 144p.
- Dlamini, P. J. Drought stress tolerance mechanisms and breeding effort in sugarcane: A review of progress and constraints in South Africa. *Plant Stress*, v. 2, n. July, p. 100027, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100027>
- Eid, A. R.; Bakry, B. A.; Taha, M. H. Effect of pulse drip irrigation and mulching systems on yield, quality traits and irrigation water use efficiency of soybean under sandy soil conditions. *Agricultural Sciences*, v. 4, n. 5, p. 249-261, 2013. <https://doi.org/10.4236/as.2013.45036>
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

- Endres, L.; Santos, C. M.; Silva, J. V.; Barbosa, G. V. S.; Silva, A. L. J.; Froehlich, A., e Teixeira, M. M. Inter-relationship between photosynthetic efficiency, $\Delta^{13}\text{C}$, antioxidant activity and sugarcane yield under drought stress in field conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 205, n. 5, p. 433-446, 2019. <https://doi.org/10.1111/jac.12336>
- Ferreira, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- Ferreira, T. H. S.; Tsunada, M. S.; Bassi, D.; Araújo, P.; Mattiello, L.; Guidelli, G. V.; Righetto, G. L.; Gonçalves, V. R.; Lakshmanan, Menossi, P. M. Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, n. 23, p. 1220-1226, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077>
- Garcia, F. H. S.; Mendonça, A. M. C.; Rodrigues, M.; Matias, F. I.; Silva Filho, M. P.; Santos, H. R. B.; Taffner, J.; Barbosa, J. P. R. A. D. Water deficit tolerance in sugarcane is dependent on the accumulation of sugar in the leaf. *Annals of Applied Biology*, v. 176, n. 1, p. 65-74, 2020. <https://doi.org/10.1111/aab.12559>
- Godoi Neto, A. H. Cana-de-açúcar irrigada com águas de diferentes níveis de salinidade e lâminas de lixiviação: respostas fisiológicas e bioquímicas. 2018. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife - PE. 2018.
- Gonçalves, I. Z.; Barbosa, E. A. A.; Santos, L. N. S.; Nazário, A. A.; Feitosa, D. R. C.; Tuta, N. F.; Matsura, E. E. Water relations and productivity of sugarcane irrigated with domestic wastewater by subsurface drip. *Agricultural Water Management*, v. 185, p. 105-115, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.01.014>
- Hermann, E. R.; Câmara, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. *Revista STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v. 17, n. 5, p. 32-34, 1999.
- 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, n. 2, p. 250-261, 2019. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1540277>
- Inman-Bamber, N. G.; Smith, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, v. 92, n. 3, p. 185-202, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>

- Inman-Bamber, N. G.; Lakshmanan, P.; Park, S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. *Field Crops Research*, v. 134, p. 95-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.004>
- Jardim, A. M. R. F.; Silva, M. V.; Silva, A. R.; Santos, A.; Pandorfi, H.; Oliveira Júnior, J. F.; Lima, J. L. M. P.; Souza, L. S. B.; Araújo Júnior, G. N.; Lopes, P. M. O.; Moura, G. B. A.; Silva, T. G. F. Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco State, Northeast Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 223, n. 2, p. 105733, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105733>
- Jardim, A. M. R. F.; Santos, H. R. B.; Alves, H. K. M. N.; Silva, S. L. F.; Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N.; Souza, M.S.; Araújo, G. G. L.; Souza, C. A. A.; Silva, T. G. F. Genotypic differences relative photochemical activity, inorganic and organic solutes and yield performance in clones of the forage cactus under semi-arid environment. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 162, p. 421-430, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.011>
- Kaiser, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and psychological measurement*, v. 20, n. 1, p. 141-151, 1960. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Keller, J., Karmeli, D. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, v. 17, p. 678-684, 1974.
- Khonghintaisong, J.; Songsri, P.; Toomsan, B.; Jongrunklang, N. Rooting and physiological trait responses to early drought stress of sugarcane cultivars. *Sugar Tech*, v. 20, n. 4, p. 396-406, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0564-0>
- Kumar, D.; Malik, N.; Sengar, R. S. Physio-biochemical insights into sugarcane genotypes under water stress. *Biological Rhythm Research*, v. 52, n. 1, p. 92-115, 2019. <https://doi.org/10.1080/09291016.2019.1587838>
- Larcher, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: Roma, 2000. 531p.
- Lira, R. M.; Silva, E. F. F.; Barros, M. S.; Gordin, L. C.; Willadino, L. G.; Barbosa, R. F. Water potential and gas exchanges in sugarcane irrigated with saline waters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 10, p. 679-682, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p679-682>

- Magalhães, J. A.; Rodrigues, B. H. N.; Santos, F. J. S.; Andrade Junior, A. S.; Araújo Neto, R. B.; Costa, N. L.; Azevêdo, D. M. M.; Pompeu, R. C. F. F.; Castro, K. N. C. Produção e composição química de variedades de cana-de-açúcar com fins forrageiros sob irrigação e adubação. *Pubvet*, v. 12, n. 12, p. 1-10, 2018. <https://doi.org/10.31533/pubvet.v12n12a230.1-10>
- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- Marin, F. R.; Inman-Bamber, G.; Silva, T. G. F.; Vianna, M. S.; Nassif, D. S. P.; Carvalho, K. S. Sugarcane evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 140, n. 4, p. 1349–1357, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03161-z>
- Matos, M.; Santos, F.; Eichler, P. Sugarcane world scenario. In *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*, Elsevier. p. 1-19, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00001-9>
- 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, n. 5, p. 1228-1236, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.02.007>
- Morais, J. E. F.; Silva, E. F. F.; Andrade, L. G. L.; Menezes, S. M.; Cutrim, E. O.; Dantas, D. C.; Silva, G. F.; Rolim, M. M. Nutritional status, Na⁺ and Cl⁻ concentrations, and yield of sugarcane irrigated with brackish waters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 11, p. 863-874, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n11p863-874>
- OCDE-FAO. *Agricultural Outlook 2019-2028*, Chapter 5: Sugar, p. 1-326. Paris: OECD-FAO, 2019.
- Oliveira, R. A.; Hoffmann, H. P.; Barbosa, G. V. S. Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar. Orgs. Curitiba: UFPR/RIDESA, 2021. 79p.
- Ogbaga, C. C.; Athar, H. R.; Amir, M.; Bano, H.; Chater, C. C. C.; Jellason, N. P. Clarity on frequently asked questions about drought measurements in plant physiology. *Scientific African*, v. 8, p. 00405, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00405>

- Phogat, V.; Skewes, M. A.; Mahadevan, M.; Cox, J. W. Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. *Agricultural Water Management*, v. 118, p. 1-11, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.015>
- Puértolas, J.; Albacete, A.; Dodd, I. C. Irrigation frequency transiently alters whole plant gas exchange, water and hormone status, but irrigation volume determines cumulative growth in two herbaceous crops. *Environmental and Experimental Botany*, v. 176, n 2, p. 104101, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104101>
- R Core Team, 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <<http://www.R-project.org/>>.
- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. V. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG, 1999. 359p.
- Santos, C. M.; Endres, L.; Silva, A. C. S.; Silva, J. V.; Barbosa, G. V. S.; Froehlich, A.; Teixeira, M. M. Water Relations and Osmolite Accumulation Related to Sugarcane Yield Under Drought Stress in a Tropical Climate. *International Journal of Plant Production*, v. 13, n. 3, p. 227-239, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00050-y>
- Segal, E.; Ben-Gal, A.; Shani, U. Root water uptake efficiency under ultra-high irrigation frequency. *Plant and Soil*, v. 282, p. 333-341, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-0003-6>
- Stallmann, J.; Schweiger, R.; Pons, C. A. A.; Müller, C. Wheat growth, applied water use efficiency and flag leaf metabolome under continuous and pulsed deficit irrigation. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 10112, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66812-1>
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6 ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017. 888p.
- Zamora, V. R. O., Silva, M. M., Santos Júnior, J. A., Silva, G. F., Menezes, D., Almeida, C. D. G. C. Assessing the productivity of coriander under different irrigation depths and fertilizers applied with continuous and pulsed drip systems. *Water Supply*, v. 21, n. 5, p. 2099-2108, 2021. doi:10.2166/ws.2021.008.

Zamora, V. R. O.; Silva, M. M.; Silva, G. F.; Santos Júnior, J. A.; Menezes, D., Menezes, S. M. Pulse drip irrigation and fertigation water depths in the water relations of coriander. *Horticultura Brasileira*, v. 37, n. 1, p. 22-28, 2019. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620190103>

Zia, R.; Nawaz, M. S.; Siddique, M. J.; Hakim, S.; Imran, A. Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, v. 242, p. 126626, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626>

CAPÍTULO IV

**CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE
IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO**

CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSADO E CONTÍNUO

RESUMO: Os impactos negativos do déficit hídrico, causados em função das variações climáticas, limitam a rentabilidade e a sustentabilidade dos canaviais. Assim, o suprimento hídrico por meio da irrigação é uma estratégia primordial para sustentar a produção da cana-de-açúcar. Contudo, a água usada para fins de irrigação deve ser gerida adequadamente, garantindo a racionalização dos recursos hídricos e a redução dos gastos com insumos agrícolas e energia. Nesse contexto, a irrigação pulsada visa dar suporte ao manejo de irrigação, melhorando o uso eficiente da água e mitigando os efeitos deletérios do déficit hídrico. Diante do exposto, objetivou-se avaliar o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar cultivada sob lâminas de irrigação pulsada e contínua. Realizou-se um experimento de campo na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), no período de dezembro de 2020 a dezembro de 2021, em arranjo experimental do tipo blocos ao acaso em esquema fatorial 2 x 5 com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por dois tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) e cinco lâminas de irrigação (40, 60, 80, 100 e 120% da evapotranspiração da cultura-ETc). Para o tipo de irrigação por pulsos, foram definidos quatro pulsos com intervalo fixo de 40 minutos de repouso entre duas aplicações. O aumento do estresse hídrico limitou o crescimento e o desenvolvimento das plantas de cana-de-açúcar. A produtividade de colmos, o rendimento de açúcar e etanol foram limitados em função da redução nas lâminas de irrigação ao longo do ciclo da cultura. A irrigação pulsada mitigou os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre as características morfológicas e produtivas da cana-de-açúcar.

PALAVRAS-CHAVE: Manejo de irrigação, *Saccharum* spp., déficit hídrico, características morfométricas

SUGARCANE GROWTH AND PRODUCTIVITY UNDER PULSED AND CONTINUOUS DRIP IRRIGATION BLADES

ABSTRACT: The negative impacts of the water deficit, caused by climatic variations, limit the profitability and sustainability of the cane fields. Thus, water supply through irrigation is a key strategy to sustain sugarcane production. However, the water used for irrigation purposes must be managed properly, ensuring the rationalization of water resources, and the reduction of waste with agricultural inputs and energy. In this context, pulsed irrigation aims to support irrigation management, improving the efficient use of water and mitigating the deleterious effects of water deficit. Given the above, the objective was to evaluate the growth and productivity of sugarcane cultivated under pulsed and continuous irrigation. A field experiment was carried out at the Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), from December 2020 to December 2021, in a randomized block-type experimental arrangement in a 2 x 5 factorial scheme with four repetitions. The treatments consisted of two types of irrigation application (pulsed and continuous) and five irrigation depths (40, 60, 80, 100 and 120% of the ET_c-crop evapotranspiration). For the pulse irrigation type, four pulses were defined with a fixed interval of 40 minutes of rest between two applications. The increase in water stress limited the growth and development of sugarcane plants. Stem productivity, sugar and ethanol yields were limited due to the reduction in irrigation depths throughout the crop cycle. Pulsed irrigation mitigated the deleterious effects of water deficit on the morphological and productive characteristics of sugarcane.

KEYWORDS: Irrigation management, *Saccharum* spp., water deficit, morphometric features

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de açúcar (*Saccharum* spp.) destaca-se no cenário agrícola mundial devido a sua alta capacidade produtiva de biomassa e bioenergia. Seu cultivo se dá em mais de 120 países, e é significativamente importante na produção de três produtos principais: açúcar, etanol e bioeletricidade (Mohanraj et al., 2021; Narayan et al., 2021; Aquino e Carlos, 2022).

De acordo com a da Organização Mundial de Alimentos (FAO, 2018), a produção mundial de cana-de-açúcar atinge cerca de 1,9 bilhão de toneladas, sendo, atualmente, o Brasil o maior produtor de cana e exportador de açúcar, com 585,2 e 26 milhões de toneladas produzidas e exportadas, respectivamente, na safra 2021/2022 (CONAB, 2022).

Segundo dados da CONAB (2022), a ocorrência de adversidades climáticas, sobretudo períodos mais longos de estiagem, limitou a produção nacional de cana-de-açúcar na safra 2021/22, levando a reduções de 7,4% na produtividade, e 19,3 e 38,9% nas exportações de açúcar e etanol, respectivamente. A produtividade da cana-de-açúcar é limitada por vários fatores ambientais (Mohanraj et al., 2021), sendo a insuficiência hídrica o estresse abiótico mais severo, responsável pela inibição do crescimento e desenvolvimento das plantas devido, principalmente, as alterações que limitam o metabolismo morfofisiológico e bioquímico das plantas (Garcia et al., 2020; Misra et al., 2020; Verma et al., 2020).

Diante dos eventos de irregularidade pluviométrica, que ocasionam déficit hídrico e ameaça a rentabilidade dos canaviais, a irrigação é o principal meio de garantir o suprimento hídrico das plantas. O uso da irrigação se destaca como estratégia fundamental para aumentar produtividade das culturas e a estabilidade socioeconômica dos sistemas de cultivos (Alves et al., 2022). Na cana-de-açúcar, a irrigação, além de contribuir para o aumento da produtividade, garante a estabilidade da produção nos canaviais devido a reduções nas variações interanuais da produção e nos custos associados ao cultivo (Cardozo et al., 2018; Dias e Sentelhas, 2019; Marin et al., 2020). Porém, há a necessidade de garantir o uso racional dos recursos hídricos, visando incrementos na quantidade e na qualidade dos produtos, bem como a sustentabilidade das áreas irrigadas.

O desenvolvimento e aprimoramento de técnicas e tecnologias que visem a gestão adequada da água de irrigação, bem como a manutenção da umidade do solo em níveis adequados para o bom desenvolvimento das culturas é fundamental para garantir a seguridade da produção agrícola. De acordo com Singh et al. (2018), a produtividade da cana-de-açúcar pode ser sustentada pelo aumento da eficiência do uso da água de irrigação. Nesse sentido, a irrigação por pulsos surge como uma técnica auxiliar do manejo da irrigação, que mantém a umidade do solo em níveis desejados e otimiza o uso de recursos como água e energia (Eid et al., 2013).

A irrigação pulsada consiste no fracionamento da lâmina de irrigação diária, aplicada em curtos períodos cíclicos de umedecimento e repouso. Essa técnica pode ser empregada como estratégia para mitigar os efeitos deletérios do estresse hídrico, pois favorece a distribuição e

manutenção da umidade no perfil do solo ao longo do dia (Eid et al., 2013; Phogat et al., 2013; Abd-elhakim, 2019). Estudos demonstram que a irrigação por pulsos pode contribuir para o aumento da eficiência do uso da água (Eid et al., 2013; Almeida et al., 2018; Zamora et al., 2021); e para o aumento da produtividade e da qualidade das culturas (Assouline et al., 2006; Bakeer et al., 2009; Zamora et al., 2019; Cormier et al., 2020).

Portanto, é pertinente avaliar os efeitos da irrigação pulsada nos cultivos irrigados de cana-de-açúcar, a fim de identificar possíveis melhorias na cultura que possam contribuir para potencialização dos canaviais irrigados e para a racionalização dos recursos hídricos, mitigando os impactos negativos do déficit hídrico sobre a cultura. Diante da incipiência de tais informações, o objetivo do trabalho foi investigar os parâmetros de crescimento e de produção da cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de campo na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) localizada em Carpina, (07°51'24" S, 35°14'16" W, a 180 m de altitude), região da Zona da Mata do Estado de Pernambuco, no período de dezembro de 2020 a dezembro de 2021.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como As Megatérmico Tropical (tropical úmido) (Alvares et al., 2014). A precipitação média dos últimos 52 anos é de 1.149 mm, sendo que a maior concentração ocorre entre o outono e o inverno, apresentando uma média de 199,6 mm no mês mais chuvoso (junho). Foi realizada a caracterização química e física do solo da área experimental nas camadas de 0-0,20 e de 0,20-0,40 m (Tabela 1). O solo da área experimental é classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrófico abrupto (EMBRAPA, 2013).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental, e caracterização química da água utilizada para irrigação, Carpina 2022

| Camada m | Características Químicas do Solo | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------------|--------------------------|---|------------------|-----------------|----------------|------------------|----------------------------------|------|------|-----|-------|-------------|--------------------|
| | pH H ₂ O | P mg dm ⁻³ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Na ⁺ | K ⁺ | Al ⁺³ | H ⁺ +Al ⁺³ | SB | CTC | m | V | M.O. | |
| | | | -----cmol _c dm ⁻³ ----- | | | | | | | | | | -----%----- | g kg ⁻¹ |
| 0 - 0,20 | 5,8 | 12,0 | 5,16 | 1,05 | 0,06 | 0,12 | 0,0 | 2,8 | 6,39 | 9,19 | 0,0 | 69,53 | 19,8 | |
| 0,20 - 0,40 | 5,9 | 12,0 | 2,31 | 0,93 | 0,04 | 0,07 | 0,0 | 3,0 | 3,35 | 6,35 | 0,0 | 52,76 | 18,8 | |

| Características Físicas do Solo | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------|-------|--------|----------------|-------------------------------|------|---|----------------|--|
| Camada | Areia | Silte | Argila | Textura | Ds | Dp | θ_{CC} | θ_{PMP} | |
| m | -----%----- | | | - | -----g cm ⁻³ ----- | | -----m ³ m ⁻³ ----- | | |
| 0 - 0,20 | 70,9 | 12,0 | 17,1 | Franco arenoso | 1,36 | 2,63 | 0,15 | 0,10 | |
| 0,20 - 0,40 | 71,0 | 9,9 | 19,1 | Franco arenoso | 1,31 | 2,56 | 0,18 | 0,12 | |

| Características Químicas da Água de Irrigação | | | | | | | | | | |
|---|--------------------|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|---------|--------------|----------|--|----------------------------|
| pH | CE | K ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Na ⁺ | Sulfato | Alcalinidade | Cloretos | RAS | Classificação ¹ |
| - | dS m ⁻¹ | -----mg L ⁻¹ ----- | | | ----- | | ----- | | (mmol L ⁻¹) ^{0,5} | - |
| 6,5 | 0,2275 | 14,0 | 16,03 | 12,64 | 60,0 | 24,82 | 140,0 | 96,11 | 2,71 | C2S1 |

SB: Soma de Bases; CTC: Capacidade de Troca de Cátions; m: Saturação por alumínio; V: Saturação por Bases; M.O: Matéria Orgânica; Ds: Densidade do Solo; Dp: Densidade de Partículas; θ : Umidade Volumétrica; CE: Condutividade Elétrica; RAS: Relação de Adsorção de Sódio; ¹ - Classificação da água para fins de irrigação de acordo com Richards (1954).

O experimento foi realizado durante o ciclo correspondente a primeira soca (segunda folha). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com 10 tratamentos distribuídos em esquema fatorial 2 x 5, sendo o primeiro fator o tipo de aplicação da irrigação (irrigação por pulsos e irrigação contínua) e o segundo fator cinco lâminas de reposição da evapotranspiração da cultura (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc), com quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais.

Para o tratamento correspondente a irrigação pulsada utilizou-se quatro pulsos de irrigação com intervalo de 40 minutos de repouso entre duas irrigações. A duração de cada pulso para os tratamentos pulsados, foi definido após o cálculo diário da lâmina de irrigação necessária pela cultura.

Cada parcela experimental foi constituída por quatro sulcos combinados (dupla fileira de plantas) de 7 m de comprimento, espaçados por 1,4 m entre sulcos e 0,6 m entre linha de plantas, resultando em 56 m² por unidade experimental, no qual os dois sulcos combinados do centro de cada parcela (20 m²) foram considerados como área útil para realização das análises. A cultivar de cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a RB041443 desenvolvida pelo Programa de Melhoramento Genético de Cana de Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, integrante da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA) (Oliveira et al, 2021).

O plantio da área foi realizado em dezembro de 2019, com material vegetal proveniente da própria EECAC. O ciclo correspondente a cana planta (2020) iniciou com a realização do preparo e correção do solo. O manejo nutricional na cana-de-açúcar, no primeiro ciclo (cana planta) foi realizado com uma aplicação de calcário dolomítico para correção da acidez do solo, aplicando-se 0,5 Mg ha⁻¹, com o objetivo de elevar o pH e neutralizar o alumínio trocável. Na

cana planta a adubação foi baseada na análise química do solo considerando a demanda nutricional da cultura de acordo com recomendação preconizada por Cavalcanti et al. (2008).

O ciclo correspondente a primeira soca, considerado para fins de análises, iniciou com o corte da cana planta em dezembro de 2020. O manejo nutricional da cana soca considerou a recomendação preconizada por Aguiar et al. (2014) para a adubação nitrogenada, no qual aplicou-se de forma convencional 100 kg ha^{-1} aos 55 dias após o corte (DAC) utilizando como fonte o sulfato de amônia, e 50 kg ha^{-1} aplicada via fertirrigação utilizando como fonte a ureia.

O fósforo e o potássio foram aplicados de acordo com recomendação preconizada por Ribeiro et al. (1999), nas doses de 40 e 140 kg ha^{-1} , respectivamente, cujo o fósforo foi aplicado todo de maneira convencional aos 55 DAC, utilizando como fonte o superfosfato triplo, e o potássio foi aplicado 80 kg ha^{-1} de forma convencional também aos 55 DAC, utilizando como fonte o cloreto de potássio, e 60 kg ha^{-1} aplicado via água de irrigação, como fonte foi utilizado o cloreto de potássio branco.

Os fertilizantes aplicados via água de irrigação, foram disponibilizados entre os meses de abril a agosto de 2021, sendo realizada uma aplicação por semana. O total aplicado nos meses de abril, maio, junho, julho e agosto foram, respectivamente de 20 , 10 , 10 , 5 e 5 kg ha^{-1} para o nitrogênio, e respectivamente de 20 , 10 , 10 , 10 e 10 kg ha^{-1} para o potássio. A cada evento de fertirrigação aplicou-se apenas a lâmina de irrigação correspondente a 100% da ETc de forma contínua para todas as parcelas experimentais, garantindo que todo o estande de plantas tivesse as mesmas condições de nutrição.

Foi realizado um suprimento nutricional com o fertilizante mineral misto do fabricante BIOGROW de nome comercial BIOSTIM COMPLEX com garantias de magnésio ($23,1 \text{ g L}^{-1}$), boro ($2,8 \text{ g L}^{-1}$), cobre ($2,5 \text{ g L}^{-1}$), ferro (25 g L^{-1}), manganês ($21,8 \text{ g L}^{-1}$), molibdênio ($0,5 \text{ g L}^{-1}$) e zinco ($21,8 \text{ g L}^{-1}$). A recomendação do produto para cana-de-açúcar, segundo o fabricante é de 2 a 3 L ha^{-1} . Realizou-se duas aplicações do produto, a primeira realizada aos 110 DAC aplicada via foliar na dose de $2,5 \text{ L ha}^{-1}$, e a segunda foi realizada via fertirrigação aos 230 DAC na dose de 2 L ha^{-1} .

O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento subsuperficial composto por fitas gotejadoras (DN 16 mm) com emissores do tipo *in line* autocompensantes e antidrenantes, espaçados a $0,50 \text{ m}$ e saída cilíndrica (tipo PC/AS, vazão de 1 L h^{-1}), alocadas no solo a uma profundidade de $0,20 \text{ m}$. O sistema era composto ainda por uma eletrobomba centrífuga de eixo horizontal ($3,5 \text{ CV}$), um sistema de filtragem e retro lavagem com dois filtros de areia, um sistema de injeção da fertirrigação composto por um manômetro glicerinado, bico injetor

venturi (1,2”) e um filtro de tela (cesta 1” de 200 mesh), e um conjunto de 10 registros de esfera para o controle do fluxo de água para cada tratamento de forma individual.

O tempo de irrigação para cada tratamento foi determinado diariamente, levando em consideração a lâmina bruta de irrigação (LB), obtida pela relação entre a ETc e a eficiência de aplicação (94%) do sistema de irrigação, obtida por meio de um teste de uniformidade de distribuição de água, realizado segundo a metodologia proposta por Keller e Karmelli (1974). O parcelamento da lâmina de irrigação foi realizado de forma manual, de acordo com o tempo de duração de cada tratamento definido antes do início da irrigação.

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi estimada diariamente com base na metodologia do Tanque Classe “A”, proposta por Doorenbos e Pruitt (1977), calculada pela seguinte equação:

$$ETc = ECA \times Kp \times Kc \times Kl \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

ETc = Evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹;

ECA = Evaporação do tanque classe A, mm dia⁻¹;

Kp = Coeficiente do tanque classe A, adimensional;

Kc = Coeficiente de cultivo, adimensional e,

Kl = Coeficiente de localização do sistema de irrigação por gotejamento, adimensional.

Os valores de Kp foram obtidos considerando dados de velocidade do vento, umidade relativa do ar e as condições de instalação do tanque classe A, que apresentava vegetação rasteira contendo bordadura de 10 m, conforme metodologia proposta por Doorenbos e Pruitt (1977). Os valores de Kc adotados no experimento segue a recomendação de Doorenbos e Kassam (1994) para cada estágio fenológico da cana-de-açúcar (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes de cultura (Kc) para cana-de-açúcar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura

| Estádios de desenvolvimento | |
|-----------------------------|------|
| Dias | Kc |
| 1 – 61 | 0,40 |
| 62 – 153 | 0,75 |
| 154 – 244 | 1,10 |
| 245 – 334 | 1,25 |
| 335 – 360 | 0,70 |

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

A aplicação dos tratamentos teve início aos 60 DAC, visando assegurar a rebrota e a estabilização do estande de plantas. Nesse período foram realizadas duas irrigações de 21 mm cada, aos 15 e 40 DAC. A lâmina de água recebida via precipitação pluviométrica foi considerada e subtraída no cálculo de cada evento de irrigação.

Por meio da Figura 2, pode-se constatar a variação dos valores de precipitação pluvial (P), evapotranspiração de referência (ET_o), ET_c e a lâmina bruta (LB) aplicada nos tratamentos correspondentes a 40, 60, 80, 100 e 120% da ET_c.

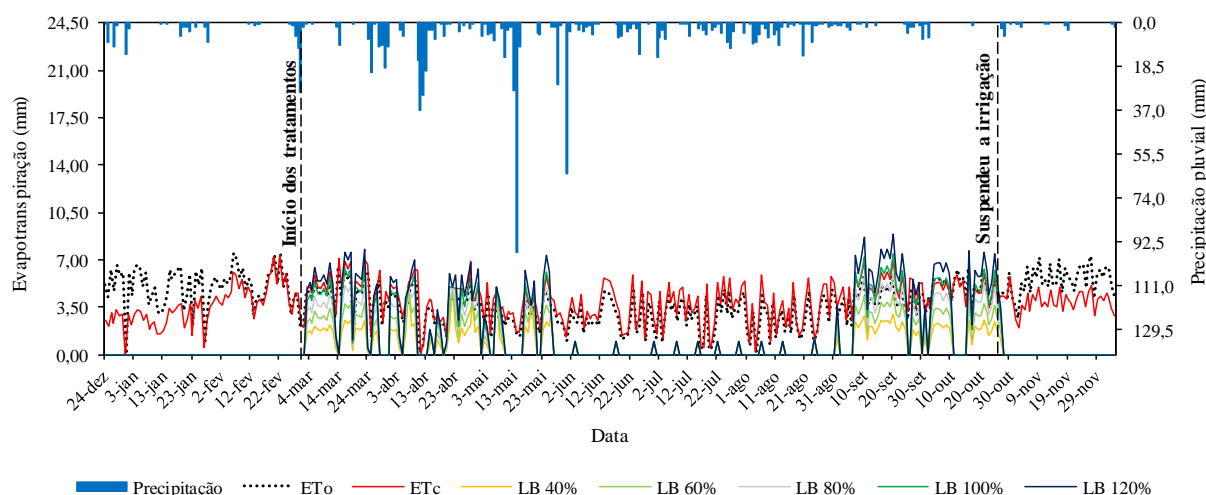


Figura 1. Valores de precipitação, evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c), e lâmina bruta aplicada nos tratamentos de 40% (LB 40%), 60% (LB 60%), 80% (LB 80%), 100% (LB 100%) e 120% (LB 120%) da ET_c na cultura da cana-de-açúcar. Carpina - PE, 2021.

O acumulado de chuva durante o ciclo da cana soca foi de 895 mm ano⁻¹, no qual os maiores índices pluviométricos foram nos meses de março a agosto, somando 764 mm, correspondente a 85,4% do acumulado para todo o ciclo, sendo o mês de maio o mais chuvoso, com acumulado de 282 mm. A ET_o acumulada ao longo do ciclo da cultura foi de 1.398 mm, com média de 4,03 mm dia⁻¹, já a ET_c acumulada foi de 1.363 mm ano⁻¹, com valor médio de 3,93 mm dia⁻¹. As lâminas de irrigação aplicadas de forma pulsada e contínua durante o ciclo da cana soca nos tratamentos correspondente a 40, 60, 80, 100 e 120% da ET_c, foram de 204, 306, 408, 510 e 612 mm, respectivamente.

Aos 310 DAC foi interrompida a irrigação promovendo um estresse hídrico na cultura, com o propósito de intensificar o acúmulo de açúcares até o momento da colheita e induzir a maturação e a concentração do açúcar, pois segundo Doorenbos e Kassam (1994) durante o

período de maturação a cana-de-açúcar necessita de baixo teor de água no solo. Após esse período, aos 352 DAC realizou-se a colheita da cana-de-açúcar.

O crescimento das plantas de cana-de-açúcar foi acompanhado por meio da realização das seguintes medições aos 60, 90, 120, 150, 180 e 350 dias após o corte (DAC): altura do colmo (AC), diâmetro do colmo (DC), número de perfilhos (NP), número de folhas verdes (NFV), comprimento (CF+3) e largura da folha (LF+3), área foliar (AF) e índice de área foliar (IAF), sendo essas medições realizadas em 10 plantas por parcela, previamente identificadas escolhidas de forma aleatória na área útil de cada parcela.

Para a determinação da AC (cm) utilizou-se uma fita métrica, e mediu-se da superfície do solo até a altura da intersecção do limbo com a bainha da folha +1, que é primeira folha de cima para baixo que se apresenta inserida com a aurícula bem visível, de acordo com Kuijper (Dillewijn, 1952). As medidas do DC (cm) foram obtidas na altura correspondente a 1/3, a partir da base do colmo, com auxílio de paquímetro. O NP (unidades por metro linear) feito por meio da contagem do número de plantas.

As medições do CF+3 (cm) e LF+3 (cm) foram feitas na terceira folha +3 levando em consideração os extremos com o auxílio de fita métrica. Em cada avaliação, foi feita a contagem do NFV (número de folhas verdes planta⁻¹), sendo consideradas como folhas verdes, aquelas totalmente expandidas com pelo menos 20% de área foliar verde, a partir da folha +1. Os dados de CF+3, LF+3 e NFV foram utilizados para a determinação da área foliar verde por planta (AF), de acordo com a metodologia proposta por Hermann e Câmara (1999), conforme a equação a seguir:

$$AF = C \times L \times 0,75 \times (N + 2) \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

AF = Área foliar, m²;

C = Comprimento da folha, m;

L = Largura da folha, m;

0,75 = Fator de correção para área foliar da cultura, adimensional

2 = Fator de ajuste referente as folhas que não estão completamente expandidas, adimensional;

NFV = Número de folhas verdes, unidade.

O IAC foi determinado pela relação entre AF da planta e a superfície do solo por ela ocupada, seguindo a metodologia de Watson (1947):

$$IAF = \frac{AF}{AOPS} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que,

IAC = Índice de área foliar, m² folhas m⁻² de solo;

AF = Área foliar, m²;

AOPS = área ocupada pela planta no solo, m².

Por ocasião da colheita, realizada aos 350 DAC, os colmos da área útil de cada parcela foram pesados com auxílio de um dinamômetro, e os valores foram extrapolados para a obtenção da produtividade de colmos (TCH, Mg ha⁻¹). Para a determinação do rendimento bruto de açúcar (RBA, Mg ha⁻¹) e etanol (RBE, m³ ha⁻¹), foram utilizados dez colmos por parcela para a determinação dos parâmetros industriais: teor de sacarose no caldo (Pol_{caldo}) e açúcares redutores totais do caldo (AR_{caldo}); obtidos de acordo com metodologia proposta por CONSECANA (2015).

O RBA e o RBE foram calculados de acordo com metodologia sugerida por Caldas (1998):

$$RBA = \frac{Pol \times TCH}{100} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$RBE = \frac{(((Pol \times f_{RBE}) + AR) \times fg) \times TCH}{100} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que:

Pol = Teor de sacarose no caldo, %;

TCH = Produtividade de colmos, Mg ha⁻¹;

f_{RBE} = Fator de transformação estequiométrica de sacarose em uma molécula de glicose mais uma de frutose, igual a 1,052;

AR = Açúcares redutores totais do caldo, %;

fg = fator de Gay-Lussac, igual a 0,6475.

Os dados de produtividade dos colmos e de rendimento de açúcar e etanol foram submetidos aos testes de normalidade, homocedasticidade e análise de variância (ANOVA) pelo teste F (p ≤ 0,05). Em seguida, os efeitos significativos para o fator lâminas de irrigação foram comparados mediante análise de regressão polinomial (p ≤ 0,05). A escolha do modelo de regressão baseou-se no maior valor de coeficiente de determinação (R²), na significância dos parâmetros da equação de ajuste (p ≤ 0,05), no efeito não significativo do desvio de regressão

e na resposta biológica de cada variável em função dos tratamentos. Os tipos de aplicação da irrigação (pulsado e contínuo) foram comparados mediante teste de médias de Tukey ($p < 0,05$). As análises foram realizadas utilizando-se o software estatístico SISVAR (Ferreira, 2019).

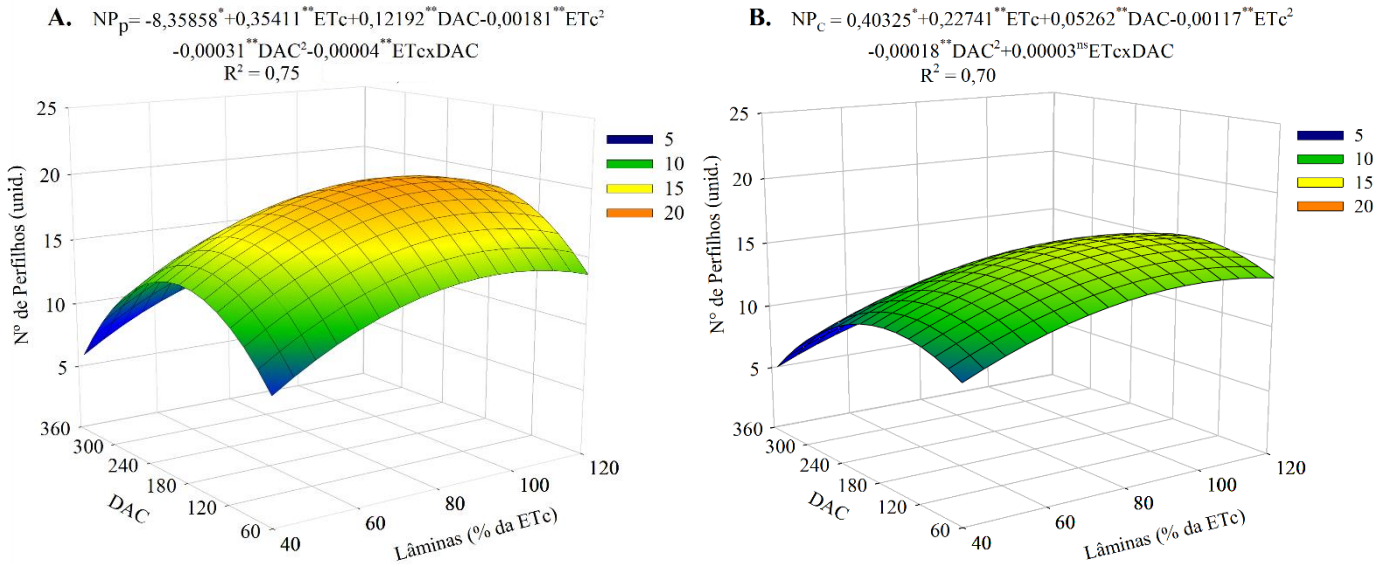
Na possibilidade de utilização do modelo de parcela subdividida no tempo para as variáveis morfológicas coletados ao longo do ciclo de cultivo da cana-soca, foi utilizado o teste de esfericidade de Mauchly e, sendo esta condição significativa ($p \leq 0,05$), foi realizada a MANOVA (Análise Multivariada) e os tratamentos ajustados por meio de modelos de regressão múltipla (superfície de resposta), considerando o tempo (dias após o corte - DAC) e as lâminas de irrigação (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc) como variáveis independentes. As análises foram realizadas utilizando o software STATÍSTICA versão 10.0 (STATSOFT, 2010). As superfícies de respostas para cada variável, foram desenhadas utilizando-se o programa gráfico Sigma Plot 12.4.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise multivariada, houve efeito significativo ($p < 0,05$) para as variáveis número de perfilhos (NP) e índice de área foliar (IAF) nas fontes de variação: tempo, interação entre tempo x lâminas e interação entre tempo x tipos de aplicação, segundo os testes de Wilks, Hotelling-Lawley e Roy; para a interação entre tempo x lâminas x tipos de aplicação houve diferença significativa apenas segundo o teste de Roy ($p < 0,05$) para ambas variáveis (NP e IAF). Para as variáveis: altura do colmo (AC), diâmetro do colmo (DC) e área foliar (AF), constatou-se diferença significativa ($p < 0,05$) pelos testes de Wilks, Hotelling-Lawley e Roy para o fator tempo, para a interação entre tempo x lâminas e para a interação entre tempo x tipos de aplicação.

A superfície de resposta para o NP da cana-soca em função das lâminas de irrigação (% da ETc) e do tempo (dias após o corte - DAC) para a irrigação pulsada, é apresentado na Figura 2A. De acordo com a derivada parcial da equação, o maior NP foi de 20,2 plantas m^{-1} , obtido na lâmina de máxima eficiência de 97,8% da ETc aos 197 DAC, revelando um incremento de 38,4% sobre a lâmina de 40% da ETc na mesma data, cujo o NP foi de 14,6 plantas m^{-1} . Analisando o efeito das lâminas de irrigação e do tempo sobre o NP para o tipo de aplicação da irrigação de forma contínua (Figura 2B), constata-se que o maior NP foi de 15,7 plantas m^{-1} , obtido na lâmina de irrigação correspondente a 97,2% da ETc, aos 146 DAC. Para essa mesma

data, houve incremento de 34,2% no NP, quando comparado com o maior nível de déficit hídrico (40% da ETc), cujo valor foi de 11,7 plantas m⁻¹. Com o NP obtido nas lâminas de máxima eficiência para os tipos de aplicação da irrigação pulsada e contínua, constata-se, incremento de 28,7% no NP, quando a irrigação é aplicada de forma pulsada.



CV - Coeficiente de variação; ns, ** e * - Não significativo, significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F

Figura 2. Superfície de resposta para o número de perfilhos (NP) da cana-de-açúcar sob efeito de lâminas de irrigação (ETc) e dias após o corte (DAC), para o tipo de aplicação da irrigação pulsada (A) e contínua (B).

O aumento do déficit hídrico reduziu o NP, o que pode estar relacionado a limitações nos processos de multiplicação e diferenciação celular nas plantas. Segundo Bezuidenhout et al. (2003), o déficit hídrico paralisa a divisão e o alongamento celular impedindo a diferenciação e o crescimento dos tecidos que darão origem a novas estruturas da planta. Aquino et al. (2018) afirmam que a ocorrência de déficit hídrico durante os estádios iniciais da cana-de-açúcar causa redução no número de perfilhos e, conseqüentemente, limita a produção da cultura.

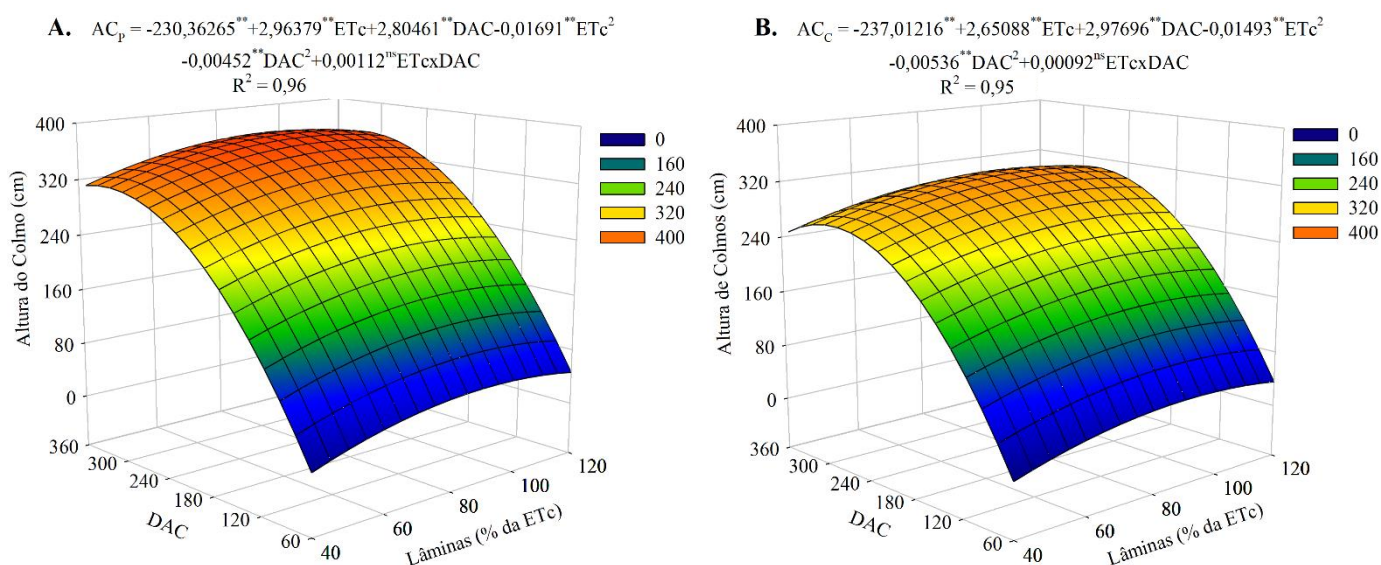
De acordo com Dingre e Gorantiwar (2021), a redução no número de perfilhos da cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico, ocorre devido à redução da umidade do solo, que reduz a absorção de água e nutrientes pelas raízes, limitando o desenvolvimento da parte aérea das plantas. Os autores obtiveram redução de 57% no número de perfilhos quando a irrigação foi realizada repondo apenas 40% da necessidade hídrica total da cultura (11 plantas m⁻¹), comparado a irrigação com 100% da demanda hídrica da cultura (18 plantas m⁻¹). Nesse sentido, nota-se que, no presente estudo, a irrigação pulsada favoreceu o NP e reduziu os efeitos

negativos do déficit hídrico em função do aumento e da manutenção da umidade do solo. Segundo Singh et al. (2018), o teor de umidade adequado no solo facilita e melhora o crescimento das raízes, a translocação adequada de nutrientes do solo para as plantas, favorecendo o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

Estudando a cana-de-açúcar (RB92579) sob lâminas de irrigação, Costa (2015) obteve na lâmina equivalente a reposição de 100% da ETc 21 plantas m⁻¹ aos 116 dias após o plantio. Lira et al. (2018) estudando os efeitos da salinidade e de lâminas de lixiviação na cana-de-açúcar (RB867515), obtiveram número máximo de perfilhos de 12,4 plantas m⁻¹ aos 120 DAC, no tratamento correspondente a água de boa qualidade e lâmina de irrigação equivalente a 120% da ETc. No presente estudo, o aumento no número de perfilho se deu até os 187 e 151 DAC, respectivamente para os tipos de aplicação da irrigação pulsada e contínua, reduzindo posteriormente. Tais resultados podem estar relacionados com as condições climáticas locais e a disponibilidade de água, que favoreceram o surgimento de novos brotos por um maior período de tempo, tal como observado também por Inman-Bamber et al. (2012), Olivier e Singels (2015) e Amaral et al. (2019), ou ainda estar relacionado a características genéticas inerentes da cultivar utilizada na pesquisa (Singels e Smit, 2009).

A redução no NP após os 187 DAC pode ser explicado pelo processo de competição natural entre as plantas por água, luz e nutrientes. De acordo com Costa (2015) a diminuição do número de plantas ao longo do tempo pode ser atribuída à competição por água, luz, nutrientes e área, refletindo na diminuição e interrupção do processo de emissão de plantas, além da morte destas, devido principalmente ao sombreamento. Manhães et al. (2015) explicam que, ao longo do tempo, a redução no processo de emissão de plantas, ou até mesmo a morte destas, está atribuído à competição por água, luz, nutrientes e área, e ocorre principalmente devido ao sombreamento.

Para a variável AC sob o tipo de irrigação pulsada (Figura 3A), o maior valor estimado por meio da derivada parcial da equação foi de 365,0 cm, obtido na lâmina de 87,6% da ETc aos 310 DAC, revelando um incremento de 18% em relação ao maior nível de déficit hídrico avaliado (40% da ETc) para a mesma data, que apresentou AC de 310,1 cm. Para o tipo de irrigação contínua (Figura 3B), o maior valor de AC estimado foi de 316,7 cm, na lâmina correspondente a 88,8% da ETc, aos 278 DAC, com incremento de 17,9% sobre a lâmina de 40% da ETc (268,7 cm) na mesma data. Analisando os tipos de aplicação na lâmina de máxima eficiência física para mesma época, a irrigação pulsada incrementou em 18% a AC quando comparado com a irrigação contínua.



CV - Coeficiente de variação; ns, ** e * - Não significativo, significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F

Figura 3. Superfície de resposta para a altura do colmo (AC) da cana-de-açúcar sob efeito de lâminas de irrigação (ETc) e dias após o corte (DAC), para o tipo de aplicação da irrigação pulsada (A) e contínua (B).

A disponibilidade de água no solo é fundamental para o crescimento das plantas, pois em condições de baixo teor de água no solo as relações hídricas das plantas são comprometidas limitando o crescimento e o desenvolvimento dos tecidos, assim como constatado neste estudo. A esse respeito, Singh et al. (2018) afirmam que o crescimento das plantas depende da divisão e do crescimento celular, que é altamente dependente das relações hídricas mesma. De acordo com Silva et al. (2020), o crescimento da cana-de-açúcar é afetado pelo déficit hídrico por restrições tanto na divisão como no alongamento celular em cana-de-açúcar.

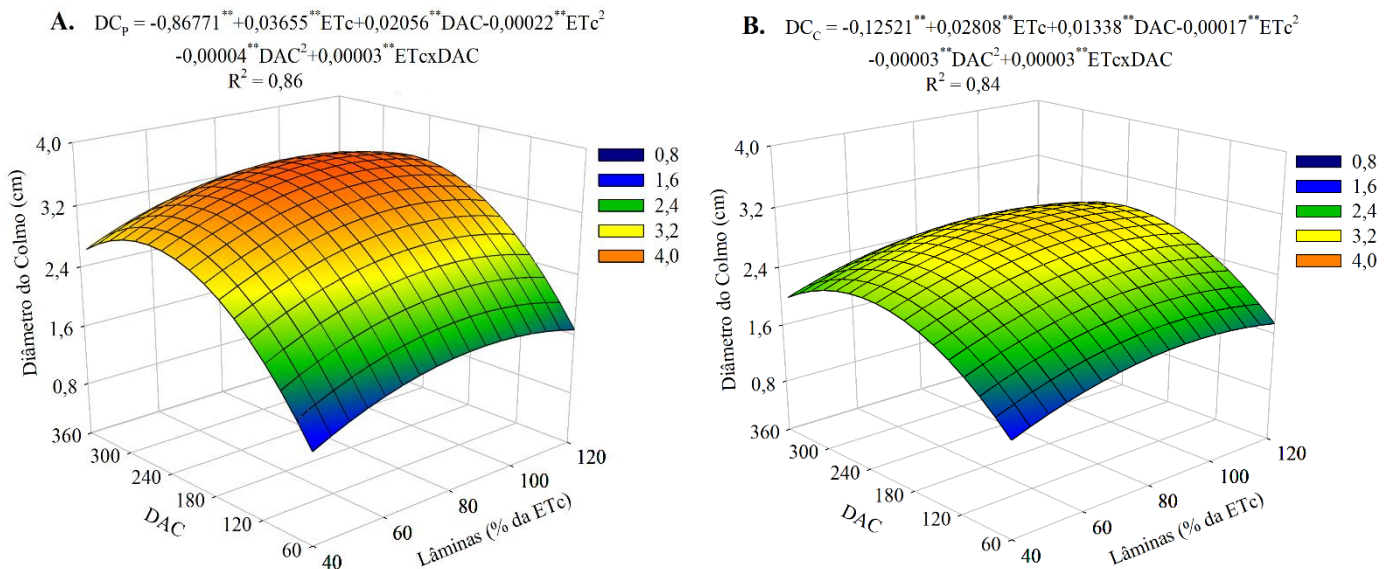
Corroborando com esses resultados, Dingre e Gorantiwar (2021) constataram reduções na altura do colmo da cana-de-açúcar (cultivar CoM-265) com a intensificação do déficit hídrico. Os autores obtiveram valores de altura do colmo de 406,7 e 258 cm repondo 100 e 40% respectivamente, da demanda hídrica da cultura, revelando redução de 50% sobre essa variável. Lira et al. (2018) obtiveram altura de colmo máxima de 493 cm para a cultivar RB867515 no tratamento correspondente a aplicação de 120% da ETc (lâmina de lixiviação) com água de boa qualidade.

No presente estudo, o crescimento do colmo se estendeu ao longo do tempo, até próximo ao período de colheita. De acordo com Allen et al. (1998), o crescimento intenso dos colmos ocorre entre 135 e 300 DAC, quando geralmente a cana-de-açúcar entra na fase de maturação

e o crescimento do colmo tende a ser inibido. Silva et al. (2014), verificaram crescimento exponencial na altura de plantas ao longo do ciclo na cana-de-açúcar, sendo os picos de incrementos obtidos aos 240 e 300 dias após o plantio (DAP).

Assim como constatado para o NP, a AC também foi favorecida pela irrigação pulsada, fato que pode estar atrelado aos efeitos dessa técnica sobre a distribuição e manutenção da umidade do solo. A esse respeito, Boyle et al. (2016) afirmam que, tanto o volume total de água quanto a frequência de irrigação são críticos para o crescimento das plantas.

Por meio da Figura 4, é possível observar a superfície de resposta para a variável DC sob os tipos de irrigação pulsada (A) e contínua (B). Para o tipo de irrigação pulsada, o maior valor para DC estimado foi de 3,9 cm, obtido na lâmina de irrigação correspondente a 83,1% da ETc aos 257 DAC, revelando incremento de 22% sobre a lâmina de 40% da ETc para a mesma data, cujo valor estimado do DC foi de 3,2 cm. Em relação ao tipo de irrigação contínuo, o maior valor estimado para o DC foi de 3,1 cm, repondo 83% da ETc obtido aos 223 DAC, com incremento de 24% em relação a lâmina de 40% da ETc (2,5 cm) para a mesma data. Comparando os máximos valores estimados para o DC sob os tipos de irrigação pulsada e contínua, observa-se incremento de 25,8% quando a irrigação foi aplicada por pulsos.



CV - Coeficiente de variação; ns, ** e * - Não significativo, significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F

Figura 4. Superfície de resposta para o diâmetro do colmo (DC) da cana-de-açúcar sob efeito de lâminas de irrigação (ETc) e dias após o corte (DAC), para o tipo de aplicação da irrigação pulsada (A) e contínua (B).

Observa-se que a limitação de água no solo limitou também o desenvolvimento do DC. De acordo com Landell e Bressiani (2010) o diâmetro do caule é um dos indicadores biométricos com alta sensibilidade ao déficit hídrico, sendo um dos primeiros parâmetros a apresentar redução quando em condições deficitárias. A redução nos processos de multiplicação e alongamento celular, regidos pela disponibilidade hídrica no solo, possivelmente estão relacionados à limitação do desenvolvimento do DC na cana-de-açúcar. Misra et al. (2020), estudando a morfologia da cana-de-açúcar (variedade CoLk 94184) em condições de déficit hídrico, obtiveram redução de 7,4% no diâmetro do colmo, quando o cultivo foi realizado em sequeiro, comparado ao cultivo sob irrigação plena.

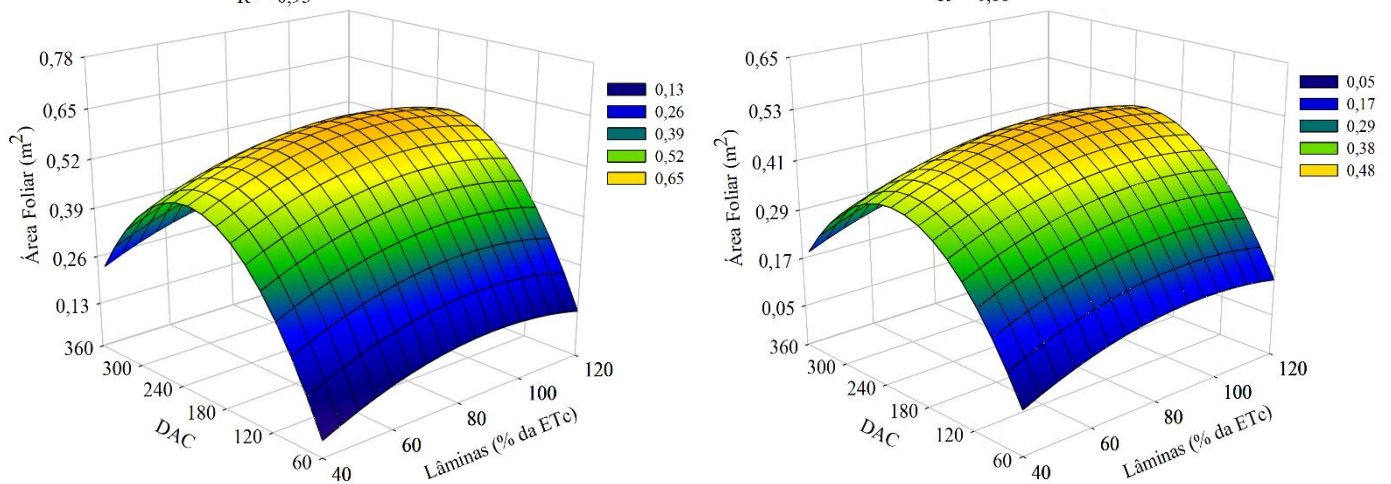
Sob cultivo irrigado, com lâmina de irrigação equivalente a 120% da ETc e água de boa qualidade, Lira et al. (2018) obtiveram para a variedade de cana-de-açúcar RB867515 diâmetro do colmo de 4,93 cm, aos 300 DAP. Silva et al. (2014), estudando a cana-de-açúcar cultivar RB 855453, sob irrigação plena, obtiveram diâmetro do colmo de 3,8 cm aos 330 DAP. Maiores valores para DC refletem um desenvolvimento mais satisfatório da cana-de-açúcar, o que pode contribuir para ganhos em produção. Segundo Maia Júnior et al. (2018), valores maiores de diâmetro do colmo, sobretudo a partir dos 150 DAP, indicam uma característica importante na contribuição da produção final.

Nota-se que o DC foi favorecido pela aplicação da irrigação pulsada. Uma vez que essa técnica contribui para a manutenção das relações hídricas das plantas, devido à maior disponibilidade de água e nutrientes para o processo de absorção pelas mesmas, características biométricas como o DC podem ser beneficiadas. Segundo Oliveira et al. (2011), o diâmetro do colmo é um parâmetro que depende das características genéticas da variedade, e também do número de perfilhos, do espaçamento utilizado, da área foliar, das condições ambientais e de cultivo da cana-de-açúcar.

O maior valor estimado para a AF foi de 0,57 m², obtido na lâmina de irrigação de 92% da ETc, aos 212 DAC para o tipo de irrigação pulsado (Figura 5A). Em relação a menor lâmina avaliada (40% da ETc) aos 212 DAC, obteve-se incremento de 26,7% sobre a AF, cujo valor estimado foi de 0,45 m². Analisando a AF quando a irrigação foi aplicada de forma contínua (Figura 5B), o maior valor estimado foi de 0,46 m², obtido na lâmina de irrigação correspondente a 94,1% da ETc aos 208 DAC, revelando incremento de 32,3% sobre a lâmina de 40% da ETc, cujo valor estimado para a AF foi de 0,34 m², aos 208 DAC. A irrigação pulsada incrementou em 24% a AF, quando comparada com a irrigação contínua em relação aos valores obtidos nas respectivas lâminas de máxima eficiência física.

A. $AF_p = -0,5631^{**} + 0,0077^{**} ETC + 0,0072^{**} DAC - 0,000042^{**} ETC^2 - 0,000017^{**} DAC^2 + 0,000001^{**} ETC \times DAC$
 $R^2 = 0,93$

B. $AF_c = -0,4281^{**} + 0,0064^{**} ETC + 0,0054^{**} DAC - 0,000034^{**} ETC^2 - 0,000013^{**} DAC^2 + 0,000001^{*} ETC \times DAC$
 $R^2 = 0,88$



CV - Coeficiente de variação; ns, ** e * - Não significativo, significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F

Figura 5. Superfície de resposta para a área foliar (AF) da cana-de-açúcar sob efeito de lâminas de irrigação (ETC) e dias após o corte (DAC), para o tipo de aplicação da irrigação pulsada (A) e contínua (B).

Em plantas de cana-de-açúcar, a área foliar média tende a aumentar até a emissão da 18ª folha, posteriormente podem ocorrer variações devido, principalmente, a mudanças de temperatura e a ocorrência de estresse hídrico, reduzindo a partir do estágio de maturação até o final do ciclo (Inman-Bamber, 1991; Robertson et al., 1998). Tais afirmações corroboram com os resultados obtidos no presente estudo, cujo aumento do estresse hídrico reduziu a AF. Dingre e Gorantiwar (2021) obtiveram redução de 30% na AF quando a irrigação foi realizada aplicando-se 40% da demanda hídrica em relação ao suprimento total.

Em plantas sob condições de deficiência hídrica ocorre uma intensificação da senescência foliar, que é atribuída à estratégia para diminuir a superfície transpirante e o gasto metabólico para a manutenção dos tecidos e/ou mecanismos de adaptação das plantas (Taiz et al., 2017).

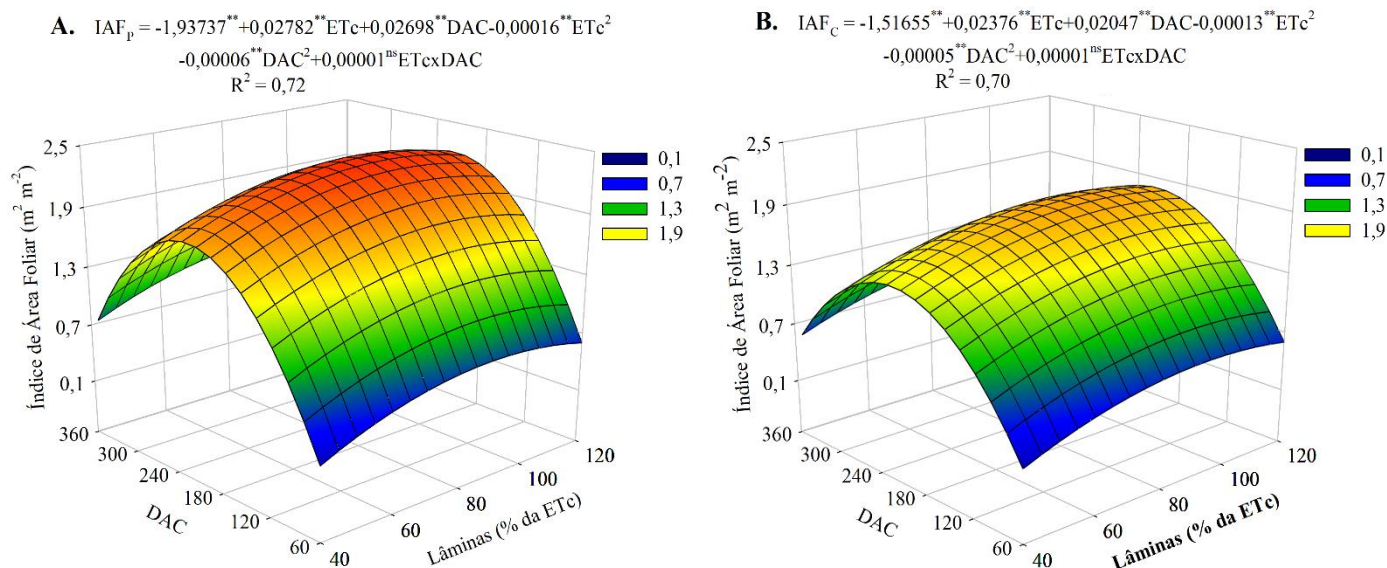
A redução da área foliar está diretamente ligada a redução do número de perfilhos e de folhas verdes, bem como a diminuição da largura e comprimento foliar. Inman-Bamber et al. (2012) afirmam que a morte de perfilhos reduz ainda a área foliar e conseqüentemente a quantidade acumulada de biomassa acumulada em cana-de-açúcar. Reduções no número de folhas verdes, número de colmos e conseqüentemente na área foliar de plantas de cana-de-

açúcar sob condições de déficit hídrico foram constatadas em estudos anteriores (Inman-Bamber et al., 2012; Dinh et al., 2017; Hoang et al., 2018; Dingre e Gorantiwar, 2021).

O aumento na AF até os 223 DAC está relacionado com o período de aumento do número de perfilhos e o crescimento intenso dos colmos. Dingre e Gorantiwar (2021) observaram que houve aumento na área foliar até os 195 DAP e a partir dos 255 DAP passou a reduzir. Os autores associaram esse comportamento, principalmente, ao rápido crescimento vegetativo dos perfilhos durante a fase de grande crescimento e, posteriormente atribuiu-se a redução na AF à queda de folhas velhas e a idade da planta. Em seu estudo, Lira et al. (2018) para a cultivar RB867515) sob irrigação plena com água de boa qualidade, obtiveram 0,65 m² de AF aos 268 DAP. Dingre e Gorantiwar (2021) para a variedade CoM-265 sob suprimento hídrico ideal, obtiveram AF de 0,61 m² aos 195 DAP.

A irrigação pulsada favoreceu a AF da cana-de-açúcar, quando comparada com a irrigação contínua. O fracionamento da aplicação da lâmina de irrigação pôde proporcionar uma distribuição de água no perfil do solo mais adequada para aumentar a eficiência de absorção de água pelas raízes das plantas, principalmente em horários de picos dos processos fotossintéticos. Singh et al. (2018) afirmam que a disponibilidade da umidade do solo a um nível ótimo durante o período de crescimento da cana-de-açúcar, auxilia na melhor expansão da área foliar e fotossíntese, resultando em maior crescimento e desenvolvimento das plantas.

A superfície de resposta para o IAF sob o tipo de irrigação pulsada, está apresentada na Figura 6A. De acordo com a derivada parcial da equação, o maior valor estimado para o IAF foi de 2,5 m² m⁻², obtido na lâmina de irrigação correspondente a 87% da ET_c aos 225 DAC, com incremento de 19,1% sobre a lâmina de 40% da ET_c (2,1 m² m⁻²) para a mesma data. Quando a irrigação foi aplicada de forma contínua, o maior valor estimado para o IAF (Figura 6B) foi de 1,9 m² m⁻², na lâmina correspondente a 91,4% da ET_c aos 205 DAC, com incremento de 35,7% sobre a menor lâmina de irrigação avaliada (40% da ET_c) na mesma data, cujo valor estimado para o IAF foi de 1,4 m² m⁻². Analisando o IAF obtido nas respectivas lâminas de máxima eficiência para os tipos de irrigação pulsado e contínuo, obteve-se incremento de 31,6% sobre essa variável quando a irrigação foi aplicada de forma pulsada.



CV - Coeficiente de variação; ns, ** e * - Não significativo, significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F

Figura 6. Superfície de resposta para o índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar sob efeito de lâminas de irrigação (ETc) e dias após o corte (DAC), para o tipo de aplicação da irrigação pulsada (A) e contínua (B).

Assim como constatado para a AF, o IAF reduziu com a intensificação do déficit hídrico. Tais resultados estão associados a reduções observadas no NP, uma vez que IAF possui relação com a densidade de plantas por área. De acordo com Silva et al. (2015), o decréscimo do IAF é altamente significante, especialmente em condições de baixa disponibilidade de água no solo. Os autores obtiveram redução de 13,6% no IAF da cana-de-açúcar (RB 855536) quando cultivada em sistema de sequeiro ($2,86 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) em relação ao sistema irrigado ($3,25 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). Aquino et al. (2017) observaram que a redução do IAF correlaciona-se com a redução na produtividade da cana-de-açúcar quando em condições de déficit hídrico.

Mais uma vez pode-se constatar que a irrigação pulsada favoreceu a manutenção e a distribuição da umidade do solo, o que pode ter contribuído para a melhoria do IAF. Aquino et al. (2017) atribuiu a redução do IAF a redução do número de perfilhos e da área foliar em cana-de-açúcar aos baixos teores de umidade do solo. Maiores valores de valores de IAF garantem as plantas maior capacidade de acúmulo de fotoassimilados e aproveitamento da energia solar, e, conseqüentemente, maiores produtividades (Taiz et al., 2017).

De acordo com a análise de variância (Tabela 3), houve efeito significativo de forma isolada dos tipos de aplicação da irrigação (pulsada e contínua) e das lâminas de reposição da

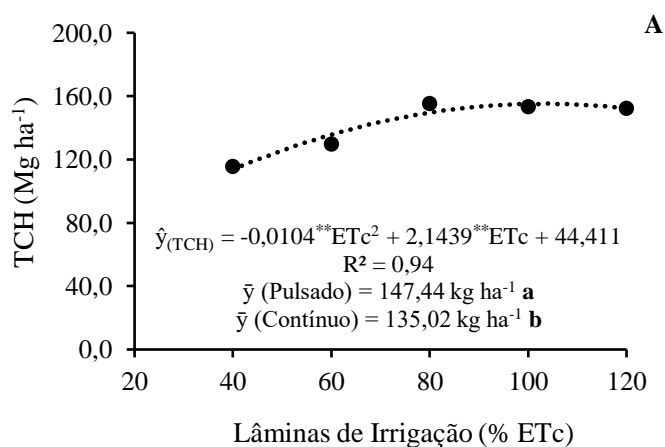
evapotranspiração da cultura (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc), para as variáveis: produtividade de colmos (TCH), rendimento bruto de açúcar (RBA) e rendimento bruto de etanol (RBE).

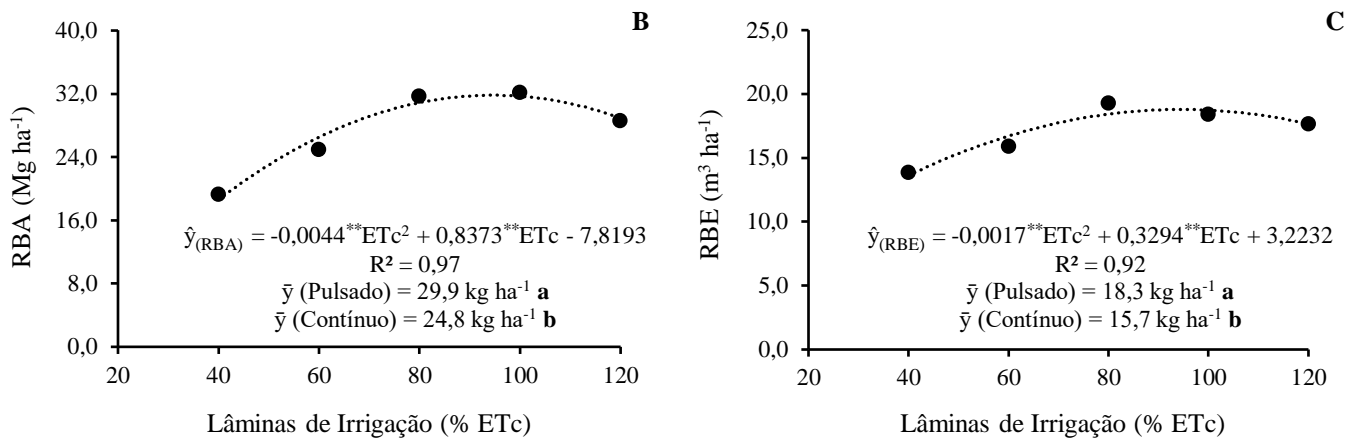
Tabela 3. Resumo da análise de variância para a produtividade de colmos (TCH), rendimento bruto de açúcar (RBA) e rendimento bruto de etanol (RBE), em cana-de-açúcar sob lâminas de irrigação pulsada e contínua

| Componentes de Produção da Cana-de-Açúcar | | | | |
|---|----|---------------------|---------------------|--------------------|
| FV | GL | Quadrado Médio | | |
| | | TCH | RBA | RBE |
| Tipos de Aplicação (T) | 1 | 1543,43** | 128,88* | 68,46** |
| Lâminas (L) | 4 | 2504,79** | 231,38** | 37,25** |
| T x L | 4 | 30,98 ^{ns} | 25,03 ^{ns} | 6,78 ^{ns} |
| Blocos | 3 | 66,96 ^{ns} | 34,28 ^{ns} | 6,79 ^{ns} |
| Resíduo | 27 | 126,80 | 27,92 | 3,55 |
| CV | % | 7,9 | 19,9 | 11,1 |

^{ns}: não significativo; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

A produtividade máxima foi de 155 Mg ha⁻¹, obtida na lâmina correspondente a 103% da ETc, apresentando incremento de 36,5% em relação a menor lâmina de irrigação aplicada (40% da ETc), cuja produtividade foi de 113,5 Mg ha⁻¹. Analisando o tipo de irrigação, pode-se constatar que a irrigação pulsada proporcionou incremento de 9,2% sobre a produtividade da cultura, em relação ao tipo de irrigação contínua (Figura 7^a).





** - Significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey para os tipos de irrigação pulsada e contínua.

Figura 7. Produtividade de colmos (TCH) (A), rendimento bruto de açúcar (RBA) (B) e rendimento bruto de etanol (RBE) (C) na cultura da cana-de-açúcar sob efeito isolado das lâminas de irrigação (ETc) e dos tipos de irrigação (pulsada e contínua).

O aumento do estresse hídrico reduziu a produtividade da cana-de-açúcar, evidenciando os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre a cultura. Estudos anteriores corroboram com estes resultados, constatando os efeitos negativos da restrição hídrica sobre a produtividade dos canaviais (Kumar et al., 2019; Garcia et al., 2020; Misra et al., 2020; Santos et al., 2019). Em condições de déficit hídrico o crescimento e o desenvolvimento das plantas são comprometidos, devido a limitações nos processos fisiológicos que compromete a produção de biomassa vegetal (Garcia et al., 2020). Sob condições de déficit hídrico severo, Misra et al. (2020) constataram redução de 21,33% na produtividade da cana-de-açúcar, quando comparada com as canas sob suprimento hídrico ideal.

Sob cultivo irrigado na região semiárida da Índia, Dingre e Gorantiwar (2021) estudando a cana-de-açúcar cultivar CoM-265, obtiveram produtividade de 174,6 Mg ha⁻¹ para a cana planta. Nas condições do nordeste brasileiro, Morais et al. (2022) estudando níveis de salinidade e frações de lixiviação em cana-de-açúcar (RB92579), obtiveram, no tratamento correspondente a irrigação sem fração lixiviação e com água de boa qualidade, TCH de 148,1 Mg ha⁻¹. Lira et al. (2019) também nas condições do Nordeste brasileiro, obtiveram TCH de 116,60 Mg ha⁻¹ para a cultivar RB867515, repondo 100% da demanda hídrica da com água de boa qualidade. As diferenças de produtividades obtidas pelas diferentes pesquisas, podem estar relacionadas as diferentes cultivares e, também ao manejo nutricional adotado em cada um dos estudos e condições ambientes cujo experimentos foram desenvolvidos.

Devido a uma melhor distribuição da umidade do solo ao longo do dia que a irrigação pulsada pode proporcionar, pode haver melhorias no desempenho produtivo das plantas. Benefícios da irrigação pulsada em relação a irrigação aplicada de forma contínua, foram constatados por Zamora et al. (2021) sobre a produtividade do coentro fertirrigado; Cruz et al. (2021) sobre a produção de vagens e grãos na cultura do amendoim. Almeida et al. (2018) concluíram que o rendimento do feijão vagem foi beneficiado com a aplicação da irrigação por pulsos, mitigando os efeitos deletérios do estresse salino. Arriero et al. (2020) observaram que a irrigação por gotejamento pulsado associado a água residuária melhorou o desempenho produtivo da cultura da berinjela.

O maior RBA foi estimado na lâmina de irrigação equivalente a 95,2% da ETc (Figura 7B), cujo valor foi de 32,0 Mg ha⁻¹, apresentando incremento de 72% sobre o maior nível de estresse hídrico avaliado (40% da ETc) no qual o valor estimado foi de 18,6 Mg ha⁻¹. Quanto ao tipo de irrigação, a irrigação pulsada incrementou em 20,6% o RBA, quando comparado com a irrigação contínua (Figura 7B). O comportamento do RBA assemelha-se ao rendimento de colmos (TCH) da cana-de-açúcar, no qual a redução na disponibilidade de água reduziu também a produção e o acúmulo de açúcar na cultura. Tal comportamento se dá em função das reduções que o déficit hídrico causou nas variáveis morfológicas, uma vez que há uma relação direta entre essas variáveis. Silva et al. (2022), associam o aumento na produção de açúcar da cana-de-açúcar irrigada com as melhorias obtidas nos parâmetros de crescimento da cultura. Segundo Ferreira et al. (2017), o déficit hídrico reduz substancialmente a produção de cana e açúcar.

A irrigação pulsada incrementou as características biométricas e o rendimento (TCH) da cana-de-açúcar, era esperado incremento também no RBA, uma vez que tais variáveis estão diretamente correlacionadas entre si. De acordo Singh et al. (2018), em condições de maior disponibilidade de água no solo, os níveis de tensão de água no solo permanecem baixos, sendo umas das principais razões para a alta produção agrícola. Costa et al. (2019), estudando cana-de-açúcar (RB92579) sob lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, obtiveram 25,6 Mg ha⁻¹ de RBA, no tratamento correspondente a lâmina 100% da ETc juntamente com 120 Kg ha⁻¹ de nitrogênio. Silva et al. (2020) obtiveram RBA de 34,4 Mg ha⁻¹ para cana-de-açúcar (RB855453) com reposição hídrica de 100% da ETc.

Em relação ao RBE (Figura 7C), o valor máximo estimado foi de 19,2 m³ ha⁻¹ na lâmina de irrigação correspondente a reposição de 97% da ETc, revelando incremento de 40,2% sobre a lâmina de 40% da ETc, cujo valor estimado foi de 13,7 m³ ha⁻¹. Analisando os tipos de

aplicação da irrigação, a irrigação pulsada proporcionou incremento de 17% sobre o RBE, quando comparada com a irrigação aplicada de forma contínua (Figura 7C). As reduções observadas no RBE em função do aumento dos níveis de estresse hídrico seguem aquelas obtidas no rendimento dos colmos (TCH) e no RBA. O déficit hídrico limita a produção de etanol, em função principalmente do crescimento e desenvolvimento dos colmos, como apresentado anteriormente. A limitação hídrica prolongada é responsável por cerca de 70% das reduções que ocorrem no rendimento da cana e dos subprodutos da cultura ao longo do seu ciclo de cultivo (Swami et al., 2018).

O incremento no RBE obtido com a aplicação da irrigação pulsada possivelmente se deve ao aumento da eficiência de absorção de água e nutrientes pelas plantas de cana-de-açúcar devido a manutenção dos teores de umidade adequados no solo proporcionados por essa técnica. Desse modo, as melhorias nas características biométricas suportam os incrementos obtidos no rendimento de colmos, açúcar e etanol constatados nesse estudo. Freitas et al. (2013), obtiveram rendimento de etanol de 12,3 m³ ha⁻¹ para a cana-de-açúcar (SP71-6949) em sistema irrigado com água de boa qualidade, repondo o equivalente a 100% da ETc. Silva et al. (2020), para a cana-de-açúcar cultivar RB 855453, obtiveram RBE de 24 m³ ha⁻¹ com reposição hídrica correspondente a 100% da ETc. Moraes (2020), obteve RBE para cultivar RB92579 de 29 m³ ha⁻¹ com lâmina de irrigação equivalente a 120% da ETc com água de boa qualidade.

4. CONCLUSÕES

O aumento do estresse hídrico limitou o crescimento e o desenvolvimento das plantas de cana-de-açúcar, ocasionando reduções no número de perfilhos, na altura e diâmetro dos colmos, área foliar e índice de área foliar.

A produtividade de colmos, o rendimento de açúcar e etanol foram limitados em função da redução nas lâminas de irrigação ao longo do ciclo da cultura.

A irrigação pulsada mitigou os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre as características morfológicas e produtivas da cana-de-açúcar.

A aplicação da irrigação de forma pulsada proporcionou maior rendimento da cana-de-açúcar, com ganhos na produtividade dos colmos, e na produção de açúcar e etanol, em relação ao tipo de aplicação da irrigação de forma contínua.

5. REFERÊNCIAS

- Abd-elhakim, A. I. Soil conditioner effect on soil wetting patterns under pulsed drip irrigation system. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, v. 36, n. 2, p. 473-492, 2019. <https://doi.org/10.21608/mjae.2019.94653>.
- Aguiar, A. T. E., Gonçalves, C., Paterniani, M. E. A. G. Z., Tucci, M. L. S. A., Castro, C. E. F. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas - Boletim 200. 7ª Ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 2014. 452p. (Boletim IAC, nº 200).
- Allen, R. G., Pereira, P. S., Raes, R., Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Dranaige Paper, 56).
- Almeida, W. F., Paz, V. P. S., Jesus, A. P. C., Silva, J. S., Gonçalves, K. S., Oliveira, A. S. Yield of green beans subjected to continuous and pulse drip irrigation with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 7, p. 476-481, 2018. <https://10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p476-481>.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves J. L. M., Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift. Stuttgart*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- Alves, H. K. M. N., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Souza, C. A. A., Leite, R. M. C., Silva, G. I. N. Souza, L. S. B., Silva, T. G. F. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 1, p. 373-392, 2022. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p373-392>.
- Amaral, M. A. C. M., Coelho, R. D., José, J. V., Oliveira, A. S. Temperatura base e taxa de crescimento de oito variedades de cana-de-açúcar. *Revista GEAMA*, v. 5, n. 1, p. 21-29, 2019.
- Aquino, G. S., Carlos, E. F. The NPK1 gene increases sugarcane productivity under water deficit and conventional crop management conditions. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 44, p. 102454, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2022.102454>.

- Aquino, G. S., Medina, C. C., Shahab, M., Santiago, A. D., Cunha, A. C. B., Kussaba, D. A. O., Carvalho, J. B., Moreira, A. Does straw mulch partial-removal from soil interfere in yield and industrial quality sugarcane? A long term study. *Industrial Crops and Products*, v. 111, p. 573-578, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.026>.
- Aquino, G. S., Medina, C. C., Costa, D. C., Shahab, M., Santiago, A. D. Sugarcane straw management and its impact on production and development of ratoons. *Industrial Crops and Products*, v. 102, p. 58-64, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.018>.
- Arriero, S. S., Almeida, W. F., Paz, V. P. S., Damasceno, L. F. Yield of eggplant using low quality water and pulse drip irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 12, p. 822-826, 2020. <https://10.1590/1807-1929/agriambi.v24n12p822-826>.
- Assouline, S., Möller, M., Cohen, S., Ben-Hur, M., Grava, A., Narkis, K., Silber, A. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 5, p. 1556–1568, 2006. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0365>.
- Bakeer, G. A. A., El-Ebabi, F. G., El-Saidi, M. T., & Abdelghany, A. R. E. Effect of pulse drip irrigation on yield and water use efficiency of potato crop under organic agriculture in sandy soils. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, v. 26, n. 2, p. 736-65, 2009. <https://doi.org/10.21608/mjae.2009.109488>.
- Bezuidenhout, C. N., Oleary, G. J., Singels, A., Bajic, V. B. A processbased model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane. *Crops and Agricultural Systems*, v.76, n.2, p. 589-599, 2003.
- Boyle, R. K. A., McAinsh, M., Dodd, I. C. Daily irrigation attenuates xylem abscisic acid concentration and increases leaf water potential of *Pelargonium × hortorum* compared with infrequent irrigation. *Physiologia Plantarum*, v. 158, n. 1, p. 23-33, 2016. <https://doi.org/10.1111/ppl.12433>.
- Caldas, C. Manual de análises selecionadas para indústrias sucroalcooleiras. Maceió: Sindicato da Indústria e do Alcool do Estado de Alagoas, 1998. 438p.
- Cardozo, N. P., Bordonal, R. O., Scala Júnior, N. L. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. *Journal of Cleaner Production*, v. 204, p. 861-871, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>.

- Cavalcanti, F. L. A.; Santos, J. C. P.; Pereira, J. R.; Leite, J. P.; Silva, M. C. L.; Freire, F. J.; Silva, D. J.; Sousa, A. R.; Messias, A. S.; Faria, C. M. B.; Burgos, N.; Lima Júnior, M. A.; Gomes, R. V.; Cavalcanti, A. C.; Lima, J. F. V. F. *Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco. 2ª aproximação. 3 ed.* Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco-IPA, 2008. 212p.
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. *Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar, Quarto Levantamento: Safra 2021/2022.* CONAB, Brasília, Brasil, v. 8, n. 4, 2022.
- CONSECANA - Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do Estado de São Paulo. *Manual de Instruções. 6.ed.* Piracicaba - SP, 2015. 80p.
- Cormier, J., Depardieu, C., Letourneau, G., Boily, C., Gallichand, J., Caron, J. Tensiometer-based irrigation scheduling and water use efficiency of field-grown strawberries. *Agronomy Journal*, v. 112, n. 4, p. 2581-2597, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20205>.
- Costa, A. R. F. C., Rolim, M. M., Simões Neto, D. E., Silva, M. M., Silva, G. F., Régis Pedrosa, E. M. Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. *IRRIGA*, v. 24, n. 1, p. 38-53, 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n1p38-53>.
- Costa, A. R. F. C. *Lâminas de irrigação e doses de nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar. 158f.* Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife - PE, 2015.
- Cruz, R. I. F., Silva, G. F., Silva, M. M., Silva, A. H. S., Santos Júnior, J. A., Silva, E. F. F. Productivity of irrigated peanut plants under pulse and continuous dripping irrigation with brackish water. *Revista Caatinga*, v. 34, n. 1, p. 208-218, 2021. <https://10.1590/1983-21252021v34n121rc>.
- Daker, A. *Irrigação e drenagem: A água na agricultura. 6 ed.* Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1984.
- Dias, H. B., Sentelhas, P. C. Dimensioning the Impact of Irrigation on Sugarcane Yield in Brazil. *Sugar Tech*, v. 21, n. 1, p. 29-37, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0619-x>.
- Dillewijn, C. V. *Botany of sugarcane.* Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371p.

- Dingre, S. K., Gorantiwar, S. D. Soil moisture based deficit irrigation management for sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in semiarid environment. *Agricultural Water Management*, v. 245, n. 9, p. 106549, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106549>.
- Dinh, T. H., Watanabe, K., Takaragawa, H., Nakabaru, M., Kawamitsu, Y. Photosynthetic response and nitrogen use efficiency of sugarcane under drought stress conditions with different nitrogen application levels. *Plant Production Science*, v. 20, n. 4, p. 412-422, 2017. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1371570>.
- Doorenbos, J., Kassan, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, (FAO. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33), 1994. 306p.
- Doorenbos, J. Y; Pruitt, W. O. Crop water requirements. FAO Estudio de Riego y Drenaje, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, n. 24, 1977. 144p.
- Eid, A. R., Bakry, B. A., Taha, M. H. Effect of pulse drip irrigation and mulching systems on yield, quality traits and irrigation water use efficiency of soybean under sandy soil conditions. *Agricultural Sciences*, v. 4, n. 5, p. 249-261, 2013. <https://doi.org/10.4236/as.2013.45036>.
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nation. OECD-FAO Agricultural Outlook: 2018-2027. 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i9166e/i9166e_Chapter5_Sugar.pdf>. Acesso em: 12 janeiro de 2022.
- Ferreira, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.
- 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, n. 23, p. 1220-1226, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077>.

- Freitas, C. A. S., Silva, A. R. A., Bezerra, F. M. L., Mota, F. S. B., Gonçalves, L. R. B., Barros, E. M. Efluente de esgoto doméstico tratado e reutilizado como fonte hídrica alternativa para a produção de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 7, p. 727-734, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000700006>.
- Garcia, F. H. S., Mendonça, A. M. C., Rodrigues, M., Matias, F. I., Silva Filho, M. P., Santos, H. R. B., Taffner, J., Barbosa, J. P. R. A. D. Water deficit tolerance in sugarcane is dependent on the accumulation of sugar in the leaf. *Annals of Applied Biology*, v. 176, n. 1, p. 65-74, 2020. <https://doi.org/10.1111/aab.12559>.
- Hermann, E. R., Câmara, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. *Revista STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v. 17, n. 5, p. 32-34, 1999.
- 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, n. 2, p. 250-261, 2018. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1540277>.
- Inman-Bamber, N. G. A growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES· Maize water balance. *South African Journal of Plant and Soil*, v. 8, n. 2, p. 93-99, 1991. https://doi.org/10520/AJA02571862_390.
- Inman-Bamber, N. G., Lakshmanan, P., Park, S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. *Field Crops Research*, v. 134, p. 95-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.004>.
- Keller, J., Karmeli, D. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, v. 17, n. 4, p. 678-684, 1974.
- Kumar, D., Malik, N., Sengar, R. S. Physio-biochemical insights into sugarcane genotypes under water stress. *Biological Rhythm Research*, v. 52, p. 92-115, 2019. <https://doi.org/10.1080/09291016.2019.1587838>.
- Landell, M. G. A., Bressiani, J. A. Genetic Improvement, Characterization and Management Varietal. In: Dinardo, M. L. L., Vasconcelos, A. C. M., Landell, M. G. A. (Eds.), *Sugarcane*. Agronomic Institute Campinas, 2010.
- Lira, R. M., Silva, E. F. F., Simões Neto, D. E., Santos Júnior, J. A., Lima, B. L. C., Silva, J. S. Growth and yield of sugarcane irrigated with brackish water and leaching fractions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 3, p. 170-175, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n3p170-175>.

- Lira, R. M. de, Silva, E. F. F., Silva, G. F., Souza, D. H. S., Pedrosa, E. M. R., Gordin, L. C. Content, extraction and export of nutrients in sugarcane under salinity and leaching fraction. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 6, p. 432-438, 2019. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n6p432-438>.
- Maia Júnior, S. D. O., Silva, J. A. C., Santos, K. P. O., Andrade, J. R., Silva, J. V., Endres, L. Caracterização morfológica e produtiva e suas correlações em cultivares de cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agrícola*, v. 16, n. 1, p. 31-42, 2018. <https://doi.org/10.28998/rca.v16i1.4060>.
- Manhães, C. M. C., Garcia, R. F., Francelino, F. M. A., Francelino, H. O., Coelho, F. C. Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. *Revista Vértices*, v. 17, n. 1, p. 163-181, 2015. <https://doi.org/10.5935/1809-2667.20150011>.
- Marin, F. R., Inman-Bamber, G., Silva, T. G. F., Vianna, M. S., Nassif, D. S. P., Carvalho, K. S. Sugarcane evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 140, n. 4, p. 1349-1357, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03161-z>.
- 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, n. 5, p. 1228-1236, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.02.007>.
- 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. 107035, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107035>.
- Morais, J. E. F., Silva, E. F. F., Andrade, L. G. L., Menezes, S. M., Cutrim, E. O., Dantas, D. C., Silva, G. F., Rolim, M. M. Nutritional status, Na⁺ and Cl⁻ concentrations, and yield of sugarcane irrigated with brackish waters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 11, p. 863-874, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n11p863-874>.

- Narayan, J. A., Chakravarthi, M., Nerkar, G., Manoj, V. M., Dharshini, S., Subramonian, N., Premachandran, M. N., Kumar, R. A., Surendar, K. K., Hemaprabha, G. Ram, G., Appunu, C. Overexpression of expansin EaEXPA1, a cell wall loosening protein enhances drought tolerance in sugarcane. *Industrial Crops and Products*, v. 159, p. 113035, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113035>.
- Oliveira, R. A., Hoffmann, H. P., Barbosa, G. V. S. Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar. Orgs. Curitiba: UFPR/RIDESA, 2021. 79p.
- Oliveira, F. M., Aspiazú, I., Kondo, M. K. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. *Revista Trópica*, v. 5, n. 1, p. 56-67, 2011. <https://doi.org/10.0000/rtcab.v5i1.305>.
- Olivier, F. C., Singels, A. Increasing water use efficiency of irrigated sugarcane production in South Africa through better agronomic practices. *Field Crops Research*, v. 176, p. 87-98, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.010>.
- Phogat, V., Skewes, M. A., Mahadevan, M., Cox, J. W. Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. *Agricultural Water Management*, v. 118, p. 1-11, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.015>.
- Ribeiro, A. C., Guimarães, P. T. G., Alvarez, V. H. V. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, 1999. 359p.
- Robertson, M. J., Bonnett, G. D., Hughes, R. M., Muchow, R. C., Campbell, J. A. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. *Functional Plant Biology*, v. 25, n. 7, p. 819-828, 1998. <https://doi.org/10.1071/PP98042>.
- Santos, C. M., Endres, L., Silva, A. C. S., Silva, J. V., Barbosa, G. V. S., Froehlich, A., Teixeira, M. M. Water Relations and Osmolite Accumulation Related to Sugarcane Yield Under Drought Stress in a Tropical Climate. *International Journal of Plant Production*, v. 13, n. 3, p. 227-239, 2019. doi:10.1007/s42106-019-00050-y.
- Silva, D. P., Johnson, R. M., Crusciol, C. A. C. The effects of cobalt on sugarcane growth and development in plant cane and two ratoon crops. *Sugar Tech*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01108-4>.

- Silva, N. F., Cunha, F. N., Teixeira, M. B., Soares, F. A. L. Crescimento e rendimento da cana-de-açúcar irrigada submetida a diferentes reposições hídricas e nitrogênio. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 14, n. 1, p. 3792-3802, 2020. <https://doi.org/10.7127/rbai.v14n100955>.
- Silva, M. D. A., Arantes, M. T., Rhein, A. F. L., Pincelli, R. P., Santos, C. M., Moura, P. C. S. Características morfofisiológicas e produtividade de cana-de-açúcar variam de acordo com a cultivar e o regime hídrico. *IRRIGA*, v. 1, n. 1, p. 160-177, 2015. <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v1n1p160>.
- Silva, N. F., Cunha, F. N., Oliveira, R. C., Moura, L. M. F., Moura, L. C., Teixeira, M. B. Crescimento da cana-de-açúcar sob aplicação de nitrogênio via gotejamento subsuperficial. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2014. <https://doi.org/10.7127/rbai.v8n100188>.
- Singels, A., Smit, M. A. Sugarcane response to row spacing-induced competition for light. *Field Crops Research*, v. 113, n. 2, p. 149-155, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.015>.
- Singh, I., Verma, R. R., Srivastava, T. K. Growth, Yield, Irrigation Water Use Efficiency, Juice Quality and Economics of Sugarcane in Pusa Hydrogel Application Under Different Irrigation Scheduling. *Sugar Tech*, v. 20, n. 1, p. 29-35, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0515-9>.
- STATSOFT. Inc. STATISTICA: Data Analysis Software System, version 10.0. 2010
- Swami, D., Dave, P., Parthasarathy, D. Agricultural susceptibility to monsoon variability: A district level analysis of Maharashtra, India. *Science of the Total Environment*, v. 619, p.559-577, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.328>.
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6 ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017. 888p.
- Verma, K. K., Singh, P., Song, X. P., Malviya, M. K., Singh, R. K., Chen, G. L., Solomon, S., Li, Y. R. Mitigating Climate Change for Sugarcane Improvement: Role of Silicon in Alleviating Abiotic Stresses. *Sugar Tech*, v. 22, n. 5, p. 741-749, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00831-0>.
- Watson, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, v.11, n.1, p.41-76, 1947.

Zamora, V. R. O., Silva, M. M., Santos Júnior, J. A., Silva, G. F., Menezes, D., Almeida, C. D. G. C. Assessing the productivity of coriander under different irrigation depths and fertilizers applied with continuous and pulsed drip systems. *Water Supply*, v. 21, n. 5, p. 2099-2108, 2021. <https://10.2166/ws.2021.008>.

Zamora, V. R. O., Silva, M. M., Silva, G. F., Santos Júnior, J. A., Menezes, D., Menezes, S. M. Pulse drip irrigation and fertigation water depths in the water relations of coriander. *Horticultura Brasileira*, v. 37, n. 1, p. 22-28, 2019. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620190103>.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados dessa pesquisa pôde-se constatar que, para as condições edafoclimáticas da região da Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco, o uso da irrigação configura-se como uma prática viável para a cultura da cana-de-açúcar, sendo um dos principais meios para assegurar a produção dos canaviais diante dos períodos de instabilidade climáticas que levam a condição de déficit hídrico, bem como de obter aumento na produtividade e na qualidade da cultura.

Contudo, há a necessidade de garantir alta eficiência na gerência da água utilizada para fins de irrigação visando a sustentabilidade e a rentabilidade econômica do sistema de cultivo irrigado. Os resultados do presente estudo fundamentam a necessidade de maiores investigações acerca da real necessidade hídrica da cultura, em especial para a cultivar RB041443 recém lançada, considerando as condições ambientais dessa região, afim de garantir o suprimento hídrico adequado à cultura e racionalizar os recursos hídricos disponíveis.

Pôde-se constatar também, que a irrigação pulsada contribuiu para a melhoria dos aspectos nutricionais, fisiológicos, de crescimento e produtivos da cana-de-açúcar, refletindo-se em ganhos de produtividade. Dessa forma, essa técnica configura-se como ferramenta promissora no aumento da eficiência dos sistemas de cultivos de cana-de-açúcar irrigado, servindo de complemento para o manejo de irrigação. No entanto, cabe a realização de estudos que investiguem os efeitos dessa técnica em ciclos subsequentes, considerando a sua influência no sistema solo/planta.

Estudos posteriores que visem conhecer e analisar a dinâmica da umidade do solo sob condições de irrigação pulsada e as possíveis correlações com as características morfofisiológicas, nutricionais e produtivas das plantas servirão de suporte para compreender os reais efeitos dessa técnica. Vale destacar também, a necessidade de estudos acerca do número de pulsos a ser aplicado, e do tempo de repouso entre duas irrigações, para que se possa chegar a uma estratégia de irrigação eficiente e adequada às condições de cultivo.