

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo deste
documento será
disponibilizado somente a
partir de 25/03/2028.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**IRRIGAÇÃO LOCALIZADA E COBERTURAS PLÁSTICAS
COLORIDAS NO MANEJO HÍDRICO DA CANA-DE-AÇÚCAR
EM SISTEMA MEIOSI**

João Carlos dos Santos Duarte

Engenheiro Agrônomo

Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**IRRIGAÇÃO LOCALIZADA E COBERTURAS PLÁSTICAS
COLORIDAS NO MANEJO HÍDRICO DA CANA-DE-AÇÚCAR
EM SISTEMA MEIOSI**

João Carlos dos Santos Duarte

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti

Coorientador: Prof. Dr. Rogério Falleiros de Carvalho

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

D812i

Duarte, João carlos dos Santos

Irrigação localizada e coberturas plásticas coloridas no manejo hídrico da cana-de-açúcar em sistema MEIOSI / João carlos dos Santos Duarte. -- Jaboticabal, 2026

69 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Luiz Fabiano Palaretti

Coorientador: Rogério Falleiros de Carvalho

1. Deficit hídrico. 2. Saccharum spp. 3. estresse abiótico. 4. Fotomorfogênese. I. Título.

Impacto potencial desta pesquisa

Esta pesquisa apresenta resultados promissores quanto ao potencial uso da irrigação localizada associada às coberturas plásticas de solo no cultivo de cana-de-açúcar em sistema MEIOSI, em condições próximas às observadas em áreas comerciais de produção. A adoção dessas estratégias contribui para a conservação da umidade do solo, redução das perdas de água por evaporação e maior eficiência no uso da água, favorecendo o estado hídrico e o desempenho fisiológico das plantas. Além disso, as coberturas plásticas coloridas mostraram potencial para modular respostas fotomorfogênicas e reduzir os efeitos do déficit hídrico, promovendo melhorias no crescimento e no desenvolvimento das mudas pré-brotadas, com impacto direto sobre a renovação, estabelecimento e a produtividade inicial do canavial.

Potential Impact of This Research

This research presents promising results regarding the potential use of localized irrigation associated with colored plastic soil mulches in sugarcane cultivation under the MEIOSI system, under conditions similar to those observed in commercial production areas. The adoption of these strategies contributes to soil moisture conservation, reduction of water losses by evaporation, and greater water use efficiency, improving plant water status and physiological performance. In addition, colored plastic mulches showed potential to modulate photomorphogenic responses and mitigate the effects of water deficit, promoting improvements in the growth and development of pre-sprouted seedlings, with direct impacts on sugarcane field renewal, crop establishment, and initial productivity.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: IRRIGAÇÃO LOCALIZADA E COBERTURAS PLÁSTICAS COLORIDAS NO MANEJO HÍDRICO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM SISTEMA MEIOSI

AUTOR: JOÃO CARLOS DOS SANTOS DUARTE

ORIENTADOR: LUIZ FABIANO PALARETTI

COORDENADOR: COORIENTADOR: ROGÉRIO FALLEIROS CARVALHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

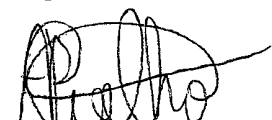


Prof. Dr. LUIZ FABIANO PALARETTI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente

 JONATHAN DOS SANTOS VIANA
Data: 14/04/2026 07:56:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JONATHAN DOS SANTOS VIANA (Participação Virtual)
Universidade da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL) / Imperatriz/MA



Prof. Dr. ANDERSON PRATES COELHO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente

 FABIO OLIVIERI DE NOBILE
Data: 14/04/2026 10:51:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FÁBIO OLIVIERI DE NOBILE (Participação Virtual)
Centro Universitário da Fundação Educacional (UNIFEB) / Barretos/SP



Dr. ANTONIO MARCIO SOUZA ROCHA (Participação Presencial)
Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão - FEPE / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 25 de março de 2026.

Dados curriculares do autor

João Carlos dos Santos Duarte nasceu em Belém – PA, Brasil em 30 de julho de 1995, filho de João de Nazaré Barreiros Duarte e Etima Maria Pereira dos Santos. Graduado em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, no Campus Belém (2020). Em 2015, fez parte da Enactus/UFRA, desenvolvendo projetos de empoderamento social em comunidades em situação de vulnerabilidade na região metropolitana de Belém. Em junho de 2016, ingressou no Programa de Educação Tutorial em Ciência do Solo – PET SOLOS, onde foi bolsista durante três anos e meio, realizando trabalhos de pesquisa, ensino e extensão em ciência do solo e educação ambiental. Em 2017, fez parte do projeto COM.TATO, no qual desenvolveu atividades de educação ambiental que possibilitasse a inclusão de pessoas com necessidades especiais. No final de 2019, foi admitido no curso de mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP/FCAV, sendo bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e integrante do Grupo de Estudos em Irrigação e Meio Ambiente da UNESP (GPIMA), onde desenvolveu pesquisas na área de irrigação, fertirrigação e cultivo protegido. Em 2022 iniciou o curso de doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) na mesma instituição e no mesmo grupo de pesquisa, onde realizou pesquisas sobre manejo de irrigação e fertirrigação na cultura da batata-doce, feijão e cana-de-açúcar. De agosto de 2024 a junho de 2025 atuou como professor substituto do curso de Engenharia Agrônômica do Instituto Taquaratinguense de Ensino Superior – ITES. Atualmente é professor adjunto I da Universidade de Araraquara – UNIARA, no curso de Engenharia Agrônômica.

“A esperança é o sonho do homem acordado”

Aristóteles

Dedico este trabalho aos meus pais,
João Duarte e Etima dos Santos, por
todo amor e cuidado. Obrigado!

AGRADECIMENTOS

Sou grato a Deus por sua infinita graça e misericórdia.

Agradeço aos meus pais, João Duarte e Etima dos Santos, por todo o amor incondicional, cuidado e dedicação que sempre tiveram comigo. Mesmo já sendo um “rapaz crescido”, nunca deixaram de estar presentes, amparando-me nos momentos difíceis, acreditando em mim quando eu mesmo duvidei e investindo nos meus sonhos, sempre com a esperança de que dias melhores viriam.

A toda a minha família que me apoiou de forma direta ou indireta, em especial aos meus irmãos, Henrique Duarte e Karen Duarte.

Ao meu orientador Luiz Fabiano Palaretti, por providenciar todos os meios para que esse estudo fosse realizado, pela confiança depositada em mim e pelos ensinamentos repassados.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Luiz Rogério Falleiros, pela disponibilidade, acolhida no laboratório de fisiologia vegetal e orientações.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade e acolhimento durante o mestrado, me propiciando vivências memoráveis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pelas oportunidades concedidas para realizar o curso de mestrado.

Agradeço aos membros da banca avaliadora da defesa de tese, Dr. Anderson Coelho, Dr. Jonathan Viana, Dr. Fábio Nobile, Dr. Antônio Rocha, e à banca avaliadora do exame geral de qualificação, Dra. Gelsa Karleane e Dr. Alexandre Barcellos Dalri pela disponibilidade e contribuições para esta pesquisa.

Ao Prof. Dr Renato de Melo Prado, pela concessão de equipamentos necessários para coleta e análises de dados necessários à pesquisa, bem como a utilização do laboratório de solos.

Ao Grupo de Pesquisa em Irrigação e Meio Ambiente (GPIMA) pelo acolhimento e suporte sempre que necessário, especialmente ao Guilherme Nascimento, Kailaine Ferreira e Gabriele Bonatte que me auxiliaram de forma direta nas atividades do experimento. Também, aos técnicos do departamento de Engenharia da FCAV/Unesp, seu Luis, Carlão e João pelo apoio nas atividades de campo do experimento. Também estendo meus agradecimentos a Sonia Maria, técnica do laboratório de fisiologia vegetal, por todo auxílio nas análises.

Aos meus amigos Eduarda Reis e Carlos Vital por toda ajuda na realização das análises que foram realizadas nessa pesquisa. A amizade e parceria fizeram surgir excelentes resultados.

Aos meus amigos Kleve Canteral e Marcilene Sarah, pelo companheirismo na vida acadêmica, por me apresentar os caminhos que facilitariam a minha pesquisa e pelo apoio na realização dela, sobretudo, pela amizade que criamos a qual tornou tudo mais leve.

Aos amigos que a UNESP me concedeu: Laura Ribera, Mariana Dias, Vanessa Dantas, Jamile Nascimento, Leticia Leite e Lara Nakamura pelos bons momentos vividos e conhecimentos compartilhados.

Ao professor Mário Lopes, meu orientador e tutor durante toda a minha graduação, por ter me ensinado a dar os primeiros passos no mundo da pesquisa.

Ao grupo PET Solos, por me proporcionar vários aprendizados que contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal. E pelos grandes amigos que fiz no grupo, em especial Leticia Vaz, Mylena Brito, Manuella Raiol, Mainara Gomes, Ana Renata Abreu, Samara Pinheiro, Eduardo Raiol, Genilson Costa, Lorenza Flor e Ranielly Monteiro, além dos que já foram mencionados nos parágrafos acima.

A turma C de Agronomia da UFRA (2015) pelos bons momentos vividos e por me apresentar pessoas que se tornariam grandes amigos, entre eles Antonio Paraense, Ellen Suane, Ingrid Leão, Alessandra Varela e Vladmir Pantoja. Também o Igor Christian, que embarcou junto comigo nessa jornada do mestrado.

Ademais, a todos que contribuíram de alguma forma para eu chegar até aqui, são muitas pessoas, mas fica registrado a minha gratidão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), código de financiamento 001.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais	1
1 Introdução	1
2 Revisão de literatura	3
2.1 Importância da cana-de-açúcar e a renovação de áreas	3
2.2 Aspectos morfológicos e fisiológicos da cana-de-açúcar	4
2.3 Cana-de-açúcar produzida em sistema MEIOSI	6
2.4 Irrigação localizada no cultivo de cana-de-açúcar	8
2.5 Necessidade hídrica da cana-de-açúcar	11
2.6 Efeito das coberturas plásticas coloridas no solo	13
2.7 Respostas fotomorfogenéticas das plantas cultivadas sob coberturas plásticas coloridas de solo	15
3 Referências	17
CAPÍTULO 2 - A cor da cobertura plástica interfere nas repostas fisiológicas e produtivas da cana-de-açúcar em sistema MEIOSI	25
RESUMO	25
ABSTRACT	26
1 Introdução	27
2 Material e métodos	29
2.1 Local do experimento e condições de cultivo	29

2.2 Delineamento experimental e manejo de tratamentos	31
2.3 Avaliações	32
2.3.1 Estado hídrico da cana-de-açúcar	32
2.3.2 Clorofila e feofitina	33
2.3.3 Crescimento	35
2.4 Análise estatística	36
3 RESULTADOS.....	36
3.1 Suprimento hídrico e seu impacto no conteúdo de água do solo	36
3.2 Caracterização da luz refletida pelas coberturas	37
3.3 Efeito das coberturas plásticas no estado hídrico da cana-de-açúcar	39
3.4 Influência das coberturas plásticas coloridas no conteúdo de pigmentos em cana-de-açúcar	41
3.5 Coberturas plásticas coloridas de solo no desenvolvimento dos colmos da cana-de-açúcar	43
4 Discussão	46
5 Conclusão	50
6 Referências	51

IRRIGAÇÃO LOCALIZADA E COBERTURAS PLÁSTICAS COLORIDAS NO MANEJO HÍDRICO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM SISTEMA MEIOSI

RESUMO - O manejo do ambiente edáfico e luminoso constitui uma estratégia relevante para a mitigação dos efeitos do déficit hídrico em sistemas modernos de produção de cana-de-açúcar. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de coberturas plásticas coloridas de solo sobre o estado hídrico, o conteúdo de pigmentos fotossintéticos e o desempenho morfofisiológico de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar cultivadas em Método interrotacional ocorrendo simultaneamente (MEIOSI). O experimento foi conduzido em condições de campo, no delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 2×5 , com quatro repetições, envolvendo dois regimes hídricos (70% e 30% da capacidade de retenção de água do solo) e cinco condições de cobertura do solo (branca, preta, azul, vermelha e ausência de cobertura). Foram utilizadas mudas da cultivar IACSP95-5094. Os resultados demonstraram que o uso de coberturas plásticas favoreceu a conservação da umidade do solo, especialmente sob déficit hídrico severo, expressando em melhorias no estado hídrico das plantas e menor comprometimento da integridade das membranas celulares, reduzindo o estresse oxidativo. Adicionalmente as coberturas coloridas promoveram efeitos no conteúdo de pigmentos fotossintéticos, refletindo em respostas fotomorfológicas, devido a qualidade espectral da luz refletida pelas coberturas. Dessa forma, o uso de coberturas plásticas coloridas pode representar uma estratégia eficiente para aumentar a resiliência fisiológica e o desempenho agrônomo da cana-de-açúcar no sistema MEIOSI, sobretudo em condições de limitação hídrica.

Palavras-chave: manejo do ambiente, déficit hídrico, qualidade espectral da luz, estresse oxidativo.

Localized irrigation and colored plastic mulches for water management of sugarcane under the MEIOSI system

Abstract - Soil and light environment management represents an important strategy to mitigate the effects of water deficit in modern sugarcane production systems. In this context, this study aimed to evaluate the effects of colored plastic soil mulches on plant water status, photosynthetic pigment content, and morphophysiological performance of pre-sprouted sugarcane seedlings grown under a simultaneous inter-rotational planting system (MEIOSI). The experiment was carried out under field conditions using a 2×5 factorial design with four replications, combining two water regimes (70% and 30% of soil water retention capacity) and five soil surface conditions (white, black, blue, red plastic mulches, and bare soil). Seedlings of the cultivar IACSP95-5094 were used. The results showed that plastic mulches enhanced soil moisture conservation, particularly under severe water deficit, resulting in improved plant water status and reduced impairment of cellular membrane integrity, as indicated by lower oxidative stress levels. In addition, colored mulches affected the content of photosynthetic pigments, leading to photomorphological responses in sugarcane seedlings. Overall, the use of colored plastic mulches proved to be an effective strategy to enhance physiological resilience and agronomic performance of sugarcane grown under the MEIOSI system, especially under conditions of limited water availability.

Keywords: environment management, water déficit, light spectral quality, oxidative stress

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1 Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ocupa posição de destaque no cenário agrícola e energético brasileiro, desempenhando papel estratégico na produção de açúcar, etanol e bioenergia, além de contribuir de forma expressiva para a matriz energética renovável e para a economia nacional (FAO, 2017; CONAB, 2025). Essa relevância está associada à elevada produtividade de biomassa da cultura, à sua eficiência fotossintética e à ampla adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, o que viabiliza sua exploração em extensas áreas do território brasileiro (Inman-Bamber e Smith, 2005; Vitti et al., 2010). Entretanto, o atual contexto de mudanças climáticas, caracterizado pelo aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, como períodos prolongados de déficit hídrico, impõe novos desafios à sustentabilidade e à estabilidade produtiva dos sistemas canavieiros (Prasara-a e Gheewala, 2016; Shukla et al., 2017).

A disponibilidade hídrica constitui um dos principais fatores limitantes ao crescimento e à produtividade da cana-de-açúcar. Apesar de apresentar metabolismo fotossintético do tipo C4, o que lhe confere maior eficiência no uso da luz, do carbono e, em parte, da água, o desenvolvimento da cultura depende de adequado suprimento hídrico ao longo de todo o ciclo (Taiz e Zeiger, 2017; Silva et al., 2014). A ocorrência de déficit hídrico compromete processos fisiológicos essenciais, como a expansão celular, a manutenção da pressão de turgor, a condutância estomática e a assimilação de CO₂, refletindo-se em reduções no perfilhamento, no crescimento dos colmos e no acúmulo de biomassa (Inman-Bamber e Smith, 2005; Farooq et al., 2009; Coelho et al., 2018). Além disso, a limitação hídrica intensifica o estresse oxidativo, promovendo desequilíbrios metabólicos e antecipação da senescência foliar, com impactos diretos sobre a produtividade e a longevidade do canavial (Oliveira Filho et al., 2021; Kumar et al., 2023).

Nesse contexto, práticas de manejo que promovam maior eficiência no uso da água e maior resiliência fisiológica das plantas tornam-se fundamentais para a sustentabilidade do setor sucroenergético. A irrigação, quando adequadamente

dimensionada e manejada, tem se consolidado como uma ferramenta importante para mitigar os efeitos da irregularidade hídrica, especialmente em regiões com má distribuição pluviométrica (Bernardo et al., 2006; Singh et al., 2020). Paralelamente, estratégias complementares, como o uso de coberturas plásticas de solo, vêm sendo amplamente estudadas por sua capacidade de reduzir perdas por evaporação, aumentar a retenção de água no solo e modificar o microclima edáfico, favorecendo o crescimento radicular e a absorção de água e nutrientes (Tarara, 2000; Jia et al., 2018; Guo et al., 2018).

Além dos efeitos físicos e hídricos, as coberturas plásticas, especialmente as coloridas, exercem influência significativa sobre a qualidade espectral da luz refletida para o dossel das plantas. Alterações nas proporções relativas dos comprimentos de onda do vermelho, vermelho-distante, azul e ultravioleta modulam respostas fotomorfogênicas mediadas por fotorreceptores como fitocromos, criptocromos e fototropinas (Quail, 2002; Franklin e Quail, 2010; Paik e Huq, 2019). Essas respostas afetam diretamente a arquitetura das plantas, o alongamento de colmos, a expansão foliar, o perfilhamento e a alocação de fotoassimilados, além de influenciar a síntese de metabólitos secundários e compostos antioxidantes (Ballaré et al., 2012; Huché-Théliet et al., 2016; Bian et al., 2022). Dessa forma, a interação entre luz, fisiologia vegetal e manejo agrícola assume papel central na compreensão dos efeitos das coberturas plásticas sobre o desempenho agrônômico das culturas.

No âmbito do setor sucroenergético, as estratégias de renovação de canaviais também vêm sendo reformuladas com o objetivo de reduzir custos, otimizar o uso de insumos e aumentar a eficiência produtiva. O Método Interrotacional Ocorrendo Simultaneamente (MEIOSI) destaca-se como uma alternativa consolidada, sobretudo em cenários de instabilidade econômica e de maior pressão ambiental (CTC, 2019). Esse sistema se baseia no plantio intercalar de linhas-mãe de cana-de-açúcar, cuja produção de colmos é utilizada como fonte de mudas para a implantação do restante da área, permitindo expressiva redução no consumo de material propagativo e nos custos de implantação do canavial (Landell et al., 2012; Bacin; Ferraz-Almeida, 2022).

A adoção do MEIOSI foi fortemente impulsionada pelo avanço da mecanização agrícola e das tecnologias de agricultura de precisão, especialmente os sistemas de

navegação por satélite embarcados em tratores, que conferem maior acurácia às operações de plantio e manejo (Leal, 2022). Adicionalmente, a ampliação do uso de mudas pré-brotadas (MPB) contribuiu para a rápida substituição varietal e para a implantação de canaviais mais uniformes e vigorosos, reforçando o papel do MEIOSI como ferramenta estratégica para a sustentabilidade produtiva do setor (Landell et al., 2021; Braga JR. et al., 2023).

Assim, esta revisão de literatura tem como objetivo reunir e discutir os principais avanços relacionados aos aspectos fisiológicos e morfológicos da cana-de-açúcar, à sua necessidade hídrica, às respostas ao déficit hídrico, ao uso de coberturas plásticas de solo e aos sistemas de renovação de canaviais, com ênfase no método MEIOSI.

2 Revisão de literatura

2.1 Aspectos morfológicos e fisiológicos da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, uma planta monocotiledônea da família Poaceae e do gênero *Saccharum*, tem sua origem presumivelmente nas terras da fronteira entre Índia, Birmânia e China, conforme indicado por Daniels e Roach (1987). Morfologicamente, a planta apresenta sistema radicular fasciculado e profundo, com elevada plasticidade, capaz de explorar grandes volumes de solo em busca de água e nutrientes. A parte aérea é composta por colmos suculentos, responsáveis pelo acúmulo de sacarose, folhas longas e lanceoladas e gemas axilares que originam os perfilhos, determinando o estande final da cultura.

O perfilhamento constitui uma das fases morfológicas mais importantes do ciclo da cana-de-açúcar, pois define o número potencial de colmos por área e, consequentemente, a produtividade agrícola. Esse processo é altamente sensível às condições ambientais, sendo influenciado pela disponibilidade hídrica, temperatura, luminosidade e nutrição mineral. Em condições favoráveis, a cultura apresenta intenso perfilhamento inicial, seguido por um processo natural de mortalidade de perfilhos, no qual apenas os mais vigorosos persistem até a colheita (Landell et al., 2021).

A planta apresenta ciclo de crescimento que geralmente varia de 12 a 18 meses antes da colheita. Esse ciclo pode variar em cada país de acordo com a variedade da planta, as condições locais de cultivo e os parâmetros geográficos (Rudorff et al., 2010; Sukyai et al., 2016; Prasara-A e Gheewala, 2016; Shukla et al., 2017). O desenvolvimento da cana-de-açúcar passa por quatro estágios principais: emergência/brotação, estabelecimento, perfilhamento, crescimento vigoroso e maturação.

A cana-de-açúcar é uma gramínea perene de metabolismo fotossintético C₄, caracterizada por elevada eficiência na assimilação de carbono, alta taxa de crescimento e grande capacidade de acúmulo de biomassa (Castro, 2016; Taiz e Zeiger, 2017). Do ponto de vista fisiológico, o metabolismo C₄ confere vantagens em ambientes tropicais, permitindo maior eficiência no uso da luz, do nitrogênio e da água, especialmente sob condições de alta irradiância e temperatura, o que a possibilita ser cultivada em todo o mundo, em regiões tropicais e subtropicais como a principal fonte de sacarose (Vitti et al., 2010; Byrt et al., 2011).

Fisiologicamente, o crescimento da cana-de-açúcar resulta da integração entre processos de fotossíntese, respiração, translocação de assimilados e expansão celular. A manutenção da pressão de turgor é essencial para a elongação dos colmos e expansão foliar, tornando a cultura altamente dependente do status hídrico do solo. Alterações nesse equilíbrio refletem-se rapidamente na redução da condutância estomática, na assimilação de CO₂ e no crescimento vegetativo (Inman-Bamber; Smith, 2005; Farooq et al., 2009).

O desenvolvimento do aparato fotossintético, expresso por atributos como área foliar, teor de clorofila e eficiência fotoquímica do fotossistema II, é outro componente central da fisiologia da cana-de-açúcar. Estudos indicam que estresses ambientais, especialmente o déficit hídrico, promovem redução da área foliar, antecipação da senescência e alterações na eficiência fotossintética, com impactos diretos sobre o acúmulo de biomassa e a produtividade (Souza et al., 2020; Leanasawat et al., 2021). Além disso, a cana-de-açúcar apresenta respostas fisiológicas adaptativas frente a condições adversas, incluindo ajustes osmóticos, alterações na partição de assimilados e ativação do sistema antioxidante. Sob estresse hídrico severo,

entretanto, esses mecanismos podem ser insuficientes, levando ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio, danos às membranas celulares e comprometimento do crescimento e da longevidade do canavial (De Oliveira Filho et al., 2021; Kumar et al., 2023).

Dessa forma, os aspectos fisiológicos e morfológicos da cana-de-açúcar estão intimamente interligados e respondem de maneira integrada às condições ambientais e ao manejo. A compreensão desses processos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias que visem à maior eficiência produtiva, sustentabilidade do sistema e resiliência da cultura frente às mudanças climáticas.

2.2 Importância da cana-de-açúcar e a renovação de áreas

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) destaca-se como uma das culturas de maior relevância socioeconômica para o Brasil, por ser cultivada desde o período colonial desempenha papel estratégico na produção de açúcar, etanol e bioenergia, representando uma importante fonte de renda para economia do país. Na safra 2025/26, a cultura ocupou aproximadamente 8,97 milhões de hectares de área colhida, com produção estimada em cerca de 666,4 milhões de toneladas e produtividade média de 74,3 t ha⁻¹, refletindo sua expressiva contribuição para o setor agroindustrial brasileiro (CONAB, 2025).

A instituição do Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL) pelo governo brasileiro, na década de 1970, em resposta à crise internacional do petróleo, impulsionou de forma significativa a expansão do setor sucroenergético, consolidando a produção de etanol como uma alternativa estratégica aos combustíveis derivados do petróleo (Casarini et al., 1987; Christofolletti et al., 2013). Dessa forma, houve a necessidade de expandir o cultivo para novas áreas. De acordo com Ogura et al. (2022), ao se observar os mapas de uso da terra no estado de São Paulo, conclui-se que a expansão das áreas de canaviais ocorreu ao mesmo tempo que as áreas de pastagens foram reduzidas, ou seja, houve uma conversão da pecuária para produção agrícola nessas regiões, o que possibilitou aumento no cultivo de cana-de-açúcar. Possibilitando a utilização de terras que antes encontravam-se ociosas.

A cana-de-açúcar apresenta, em média, longevidade produtiva de quatro a seis safras, a qual é fortemente influenciada pelas condições edafoclimáticas, pela cultivar

utilizada e pelo sistema de manejo adotado. A cultura caracteriza-se ainda pelo elevado nível de mecanização ao longo de todo o ciclo produtivo, englobando as etapas de implantação do canavial, condução das soqueiras e colheita, refletindo o avanço tecnológico e a intensificação dos sistemas de produção no setor sucroenergético brasileiro (Embrapa, 2018; IAC, 2020). Após cada corte, o canavial apresenta um processo gradual de exaustão, caracterizado pela redução progressiva da produtividade e da resposta aos tratos culturais nas soqueiras, tornando necessária a reforma periódica da área para garantir a manutenção do fluxo contínuo de matéria-prima.

A reforma periódica dos canaviais é uma prática indispensável para a manutenção da produtividade agrícola, uma vez que a longevidade da cultura é limitada pelo declínio fisiológico das soqueiras, compactação do solo e aumento da incidência de pragas e doenças. Tradicionalmente, esse processo tem sido realizado por meio de sistemas convencionais de preparo intensivo do solo, os quais, apesar de eficientes, apresentam elevados custos operacionais e impactos ambientais, com destaque as propriedades físico-hídricas fundamentais, como porosidade de aeração, retenção de água, disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração (Tormena et al., 1998, Camilotti et al., 2005)

Nesse contexto, sistemas alternativos, como o MEIOSI, têm sido adotados visando maior sustentabilidade e redução do uso de mudas comerciais (Landell et al., 2012; Cherubin et al., 2016; Marques et al., 2019).

2.3 Cana-de-açúcar produzida em sistema MEIOSI

O Método Interrotacional Ocorrendo Simultaneamente (MEIOSI) consolidou-se como uma das principais estratégias de renovação de canaviais no setor sucroenergético brasileiro, sobretudo em um contexto marcado pelo aumento dos custos de implantação, necessidade de maior eficiência no uso de insumos e adaptação às mudanças climáticas. De acordo com o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC, 2019), o MEIOSI destaca-se por reduzir significativamente a demanda por material propagativo e por permitir maior racionalização das operações agrícolas durante a reforma do canavial, tornando-se uma alternativa tecnicamente viável e economicamente atrativa.

Embora o MEIOSI tenha sido desenvolvido ainda no início da década de 1980, sua adoção em larga escala foi intensificada a partir dos avanços na mecanização agrícola e na agricultura de precisão. O uso de sistemas de navegação por satélite (GNSS) embarcados em tratores permitiu maior precisão no espaçamento entre linhas, melhor paralelismo e padronização das operações de plantio, fatores essenciais para o sucesso operacional do método (Leal, 2022). Esses avanços tecnológicos contribuíram para reduzir falhas de plantio e aumentar a eficiência da multiplicação de colmos na área-mãe.

O princípio operacional do MEIOSI baseia-se no plantio de cana-de-açúcar em apenas uma fração da área total de reforma, denominada área-mãe, que geralmente corresponde a 10 a 20% da área total. Os colmos produzidos nessa área são posteriormente utilizados como mudas para o plantio do restante do canavial, permitindo uma redução no consumo de mudas entre 60 e 80% quando comparado ao sistema convencional de plantio mecanizado em área total (CTC, 2019; Landell et al., 2021). Essa expressiva economia de material propagativo representa um dos principais diferenciais do método.

Durante o período de condução da área-mãe, a área remanescente pode ser ocupada por culturas de ciclo curto, como soja e amendoim, ou por espécies utilizadas como adubos verdes, a exemplo da crotalária. Essa prática possibilita melhor aproveitamento da área agrícola, redução do período improdutivo do solo e, em alguns casos, geração de receita adicional, além de benefícios agronômicos relacionados à ciclagem de nutrientes e à melhoria das condições físicas e biológicas do solo (Landell et al., 2021; Braga Jr. et al., 2023).

A consolidação do MEIOSI está intimamente relacionada à expansão do uso de mudas pré-brotadas (MPB), especialmente a partir dos anos 2000. A associação entre MEIOSI e MPB permite elevada sanidade do material propagativo, maior uniformidade de estande e aceleração do processo de multiplicação varietal, tornando o sistema estratégico para a rápida substituição de variedades antigas por cultivares modernas, mais produtivas e adaptadas às novas condições edafoclimáticas (Landell et al., 2021). Estudos indicam que a taxa de multiplicação no sistema MEIOSI associado à MPB pode superar 1:12, enquanto sistemas convencionais

frequentemente apresentam taxas entre 1:6 e 1:8, prolongando o tempo necessário para a renovação completa do canavial (Braga Jr. et al., 2023).

Sob o ponto de vista econômico, o MEIOSI apresenta vantagens expressivas. Avaliações técnicas demonstram que o sistema pode promover redução de 25 a 40% nos custos de implantação de novos canaviais, principalmente em função da menor necessidade de mudas e da racionalização das operações de plantio e transporte de material vegetal (Bacin e Ferraz-Almeida, 2022). Quando associado ao cultivo de culturas anuais, como a soja, o MEIOSI permite ainda a diluição dos custos da reforma, aumentando a viabilidade econômica do sistema e reduzindo a dependência de capital externo no período de implantação.

Além dos ganhos econômicos, o MEIOSI contribui para a sustentabilidade dos sistemas de produção de cana-de-açúcar. A redução no volume de mudas transportadas e plantadas diminui o tráfego de máquinas, reduzindo riscos de compactação do solo e consumo de combustível. Adicionalmente, a possibilidade de integração com sistemas de rotação de culturas favorece práticas conservacionistas e melhora a resiliência do canavial frente a estresses ambientais (CTC, 2019; Leal, 2022).

Dessa forma, o MEIOSI configura-se como uma tecnologia central para a renovação racional de canaviais, combinando eficiência econômica, otimização do uso de recursos e flexibilidade operacional. Sua ampla adoção reflete a necessidade do setor sucroenergético de incorporar sistemas produtivos mais eficientes, sustentáveis e alinhados às exigências atuais de competitividade e adaptação às mudanças climáticas.

2.4 Irrigação localizada no cultivo de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura de elevada relevância econômica e estratégica para o Brasil, cuja produtividade é fortemente influenciada pela disponibilidade hídrica ao longo do ciclo. Embora grande parte da área cultivada seja conduzida em regime de sequeiro, a irregularidade das chuvas, a expansão da cultura para regiões com maior risco climático e o aumento da frequência de períodos de déficit hídrico têm

impulsionado a adoção de sistemas de irrigação como ferramenta para redução de riscos produtivos e aumento da eficiência do uso da água (FAO, 2017).

De acordo com o Atlas da Irrigação do Brasil, a cana-de-açúcar figura entre as culturas com maior potencial de expansão da área irrigada, sobretudo nas regiões Centro-Oeste e Sudeste, onde a irrigação é empregada como estratégia de suplementação hídrica em períodos críticos do desenvolvimento da cultura (ANA, 2021). Nesse contexto, a irrigação localizada tem se destacado como alternativa tecnicamente eficiente e ambientalmente mais sustentável em comparação a métodos convencionais, como sulcos e aspersão.

A irrigação localizada, especialmente por gotejamento superficial e subsuperficial, caracteriza-se pela aplicação de água em baixa vazão diretamente na zona radicular das plantas, permitindo maior controle da lâmina aplicada e do momento da irrigação. Esse método reduz perdas por evaporação, escoamento superficial e percolação profunda, promovendo maior eficiência no uso da água (FAO, 2017; Darouich et al., 2014). Para a cana-de-açúcar, essa eficiência é particularmente relevante, uma vez que a cultura apresenta elevada demanda hídrica e sensibilidade ao estresse hídrico em fases como perfilhamento, alongamento dos colmos e rebrota das soqueiras.

Estudos indicam que a manutenção da umidade do solo próxima à capacidade de campo na região explorada pelas raízes favorece processos fisiológicos essenciais, como expansão celular, assimilação de carbono e transporte de fotoassimilados, refletindo em maior acúmulo de biomassa e produtividade agrícola (Inman-Bamber; Smith, 2005; Silva et al., 2018). Revisões internacionais apontam que incrementos significativos de produtividade e estabilidade produtiva podem ser obtidos com o uso de irrigação localizada, especialmente em ambientes com déficit hídrico moderado a severo (Singh et al., 2020).

O gotejamento subsuperficial (subsurface drip irrigation – SDI) tem recebido destaque no cultivo da cana-de-açúcar por permitir maior eficiência hídrica e menor interferência com operações mecanizadas. A instalação dos emissores abaixo da superfície do solo reduz ainda mais as perdas por evaporação e contribui para o aprofundamento do sistema radicular, favorecendo a exploração do perfil do solo e a

longevidade do canavial (Grecco et al., 2019). Além disso, o SDI tem se mostrado particularmente vantajoso em áreas de cana-socaria, nas quais a manutenção de condições hídricas adequadas é fundamental para a sustentabilidade do sistema produtivo.

Outro aspecto relevante da irrigação localizada é a possibilidade de integração com a fertirrigação. A aplicação conjunta de água e nutrientes permite maior eficiência no uso de fertilizantes, reduzindo perdas por lixiviação e volatilização e favorecendo a disponibilidade imediata de nutrientes na zona de absorção radicular (FAO, 2017). Em cana-de-açúcar, a fertirrigação via gotejamento tem sido associada ao aumento da eficiência do uso do nitrogênio e do potássio, com reflexos positivos sobre a produtividade e a qualidade tecnológica da matéria-prima (Silva et al., 2018; Singh et al., 2020).

Do ponto de vista edáfico, a irrigação localizada contribui para a conservação da estrutura do solo, ao reduzir a ocorrência de encharcamento e a compactação superficial. A aplicação localizada de água favorece ainda a atividade microbiana e a dinâmica da matéria orgânica, criando um ambiente mais estável para o crescimento radicular e para os processos de mineralização de nutrientes (Darouich et al., 2014). Esses efeitos são particularmente relevantes em regiões semiáridas, onde a irrigação localizada possibilita a manutenção da produtividade mesmo sob restrições hídricas severas.

Apesar das vantagens agronômicas e ambientais, a adoção da irrigação localizada na cana-de-açúcar envolve desafios relacionados aos custos de implantação, à necessidade de manejo técnico especializado e ao risco de obstrução dos emissores. A viabilidade econômica do sistema depende de fatores como disponibilidade de água, custo de energia, valor da produção e nível tecnológico da unidade produtiva (ANA, 2021). Ainda assim, análises técnicas e econômicas indicam que, em áreas com déficit hídrico recorrente ou sistemas intensivos de produção, a irrigação localizada apresenta elevado potencial de retorno ao longo do ciclo do canavial.

Diante do cenário de mudanças climáticas e da crescente demanda por sustentabilidade, a irrigação localizada consolida-se como uma tecnologia estratégica

para o cultivo da cana-de-açúcar, ao promover maior eficiência no uso da água e dos insumos, reduzir impactos ambientais e aumentar a estabilidade produtiva (FAO, 2017; ANA, 2021).

2.5 Necessidade hídrica da cana-de-açúcar

A água desempenha papel central no funcionamento das plantas, atuando como componente estrutural e meio de transporte, além de sustentar a pressão de turgor necessária à expansão celular, abertura estomática, carregamento e fluxo no floema, transporte de solutos através de membranas e manutenção da rigidez de tecidos não lignificados (Taiz e Zeiger, 2017). Na cana-de-açúcar, essas funções se refletem diretamente no estabelecimento do dossel, no perfilhamento, na alongação dos colmos e, conseqüentemente, no acúmulo de biomassa e produtividade final.

O consumo de água pela cultura é governado, em grande parte, pelas trocas de energia na superfície cultivada e pelos gradientes no continuum solo-planta-atmosfera, de modo que a disponibilidade hídrica no volume explorado pelas raízes condiciona a taxa de transpiração e o desempenho ecofisiológico ao longo do ciclo (Inman-Bamber e Smith, 2005). Em termos práticos, a necessidade hídrica é usualmente expressa pela evapotranspiração da cultura (ET_c), estimada pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ET_o) e o coeficiente de cultivo (K_c), obtido experimentalmente ou ajustado para condições locais (Allen et al., 1998). Para a cana-de-açúcar, valores de K_c variam com o estágio fenológico, arquitetura do dossel, e condições meteorológicas; como referência, Allen et al. (1998) indicam K_c entre ~0,4 (estabelecimento/copa baixa) e ~1,25 (copa completa), com redução na fase final. Estudos mais recentes, conduzidos sob condições específicas, reforçam que esses valores podem requerer calibração local: em ambiente semiárido sob irrigação por gotejamento, foram observados K_c médios de 0,70 (perfilhamento), 1,20 (crescimento máximo) e 0,78 (maturação), com ET_c anual em torno de 1.291–1.388 mm (Dingre; Gorantiwar, 2020). Em perspectiva metodológica, revisões de atualização do FAO-56 indicam que os K_c tabulados continuam sendo uma base robusta, mas enfatizam que ajustes regionais seguem necessários quando se busca maior acurácia (Pereira et al., 2021).

Quanto à demanda hídrica total, a literatura clássica reporta ampla faixa de 1.000 a 2.500 mm por ciclo (Doorenbos e Kassam, 1979), e estudos recentes mantêm intervalos semelhantes, frequentemente situando o consumo entre ~1.500 e 2.500 mm, a depender de clima, duração do ciclo (cana-planta e soqueiras), variedade e nível de déficit imposto (Barbosa et al., 2024). Em ambientes tropicais, estimativas de balanço hídrico e abordagem Penman–Monteith também indicam elevada variabilidade espacial e sazonal; por exemplo, em condições de cultivo tropical foram relatadas necessidades compatíveis com diferenças de precipitação e demanda atmosférica, reforçando a importância do balanço entre chuva efetiva e irrigação para suprir a ETc (Silva et al., 2014). No Brasil, valores diários de consumo hídrico frequentemente se situam na ordem de 2,0 a 6,0 mm dia⁻¹, variando conforme estágio de desenvolvimento, época do ano e região (Bernardo et al., 2006). Em consonância, Avilez et al. (2018) registraram diferenças de necessidade hídrica total entre áreas do noroeste paulista (1.095 e 1.595 mm/safra), com médias diárias de 3,5 e 4,1 mm dia⁻¹, o que reforça que a demanda real no campo responde fortemente ao ambiente e ao manejo.

Do ponto de vista agrônomo, a cana-de-açúcar é particularmente sensível à restrição hídrica em fases-chave do ciclo, com destaque para o estabelecimento inicial e o perfilhamento, quando a formação do estande e do dossel define o potencial produtivo (Inman-Bamber e Smith, 2005; Barbosa et al., 2024). Quando o déficit hídrico se intensifica, são frequentes reduções em área foliar, diâmetro de colmo, número de perfilhos e acúmulo de massa seca da parte aérea (Teixeira et al., 2020). Em nível fotossintético, a limitação de água tende a reduzir a condutância estomática e a assimilação de CO₂, afetando a eficiência fotoquímica do fotossistema II e os pigmentos fotossintéticos, sobretudo em cultivares menos tolerantes (Souza et al., 2020; Leanasawat et al., 2021). Paralelamente, o desequilíbrio entre captação de energia e uso metabólico aumenta a formação de espécies reativas de oxigênio, elevando marcadores de estresse oxidativo e potencializando danos de membrana, o que se expressa, por exemplo, em queda do teor relativo de água e do potencial hídrico foliar sob seca severa (Oliveira Filho et al., 2021). Revisões recentes reforçam que, em cana, o déficit hídrico desencadeia respostas integradas no ajuste osmótico, remodelamento metabólico e ativação de sistemas antioxidantes, mas que a

magnitude dessas respostas depende de genótipo, estágio de desenvolvimento, intensidade e duração do estresse, o que explica variações marcantes na penalização de crescimento e produtividade entre ambientes e cultivares (Kumar et al., 2023). Assim, a redução de crescimento sob seca decorre de um conjunto de processos interligados: alterações nas relações hídricas, queda na assimilação de carbono, acúmulo de estresse oxidativo, danos a membranas e inibição/redistribuição de atividades enzimáticas e metabólicas (Inman-Bamber e Smith, 2005; Farooq et al., 2009).

2.6 Efeito das coberturas plásticas coloridas no solo

O uso de coberturas plásticas no solo tem sido amplamente adotado em sistemas agrícolas devido aos seus efeitos positivos sobre o microambiente edáfico, especialmente no que se refere à conservação de água, à modulação térmica e à dinâmica de nutrientes. De acordo com Jia et al. (2018), a cobertura plástica atua como uma barreira física entre o solo e a atmosfera, reduzindo significativamente as perdas de água por evaporação e aumentando a retenção hídrica no perfil superficial do solo, o que contribui para maior disponibilidade de água às plantas e menor demanda por irrigação. Corroborando esses resultados, Zhang et al. (2021) observaram incremento de 8,83% no conteúdo de água do solo quando o uso de cobertura plástica foi associado a sistemas de irrigação, evidenciando um efeito sinérgico entre essas práticas de manejo.

A manutenção da umidade do solo sob cobertura plástica está associada, ainda, à regulação da distribuição vertical da água no perfil, favorecendo o movimento ascendente por capilaridade e transferência de vapor das camadas mais profundas para a superfície. Como consequência, o teor de água no solo superficial tende a permanecer mais estável ao longo do tempo (Tian et al., 2003; Wang et al., 2003; Xiukang et al., 2015). Resultados experimentais reforçam esse efeito, uma vez que Li et al. (2020) verificaram maiores teores de umidade superficial em solos cobertos quando comparados a áreas sem cobertura.

Nesse contexto, a cobertura plástica contribui para a mitigação do déficit hídrico, prolongando a disponibilidade de água no solo e favorecendo uma distribuição mais eficiente de nutrientes na zona radicular, o que pode resultar em melhor

crescimento e desempenho das culturas (Guzmán, 2020). Em regiões áridas e semiáridas, esses benefícios tornam-se ainda mais relevantes, pois a redução da evaporação e a maior retenção hídrica permitem a manutenção do desenvolvimento vegetal sob condições de menor oferta de água (Guo et al., 2018).

Além dos efeitos hídricos, o uso de coberturas plásticas promove alterações significativas na temperatura do solo. As coberturas coloridas absorvem grande parte da radiação solar incidente, elevando sua temperatura superficial. Quando instaladas em contato direto com o solo, a camada de ar entre o plástico e a superfície edáfica é reduzida, favorecendo a transferência de calor por condução e resultando em aquecimento do solo (Tarara, 2000). O plástico também atua como uma barreira térmica, limitando a perda de calor do solo para a atmosfera e reduzindo a amplitude térmica diária, o que proporciona um ambiente mais estável para o crescimento das plantas (Abdul-Baki e Stommel, 2005; Liu et al., 2018).

Em regiões de clima frio, esse efeito térmico pode ser particularmente benéfico, uma vez que o aumento da temperatura do solo cria condições mais favoráveis ao crescimento radicular. Estudos indicam que o espaço de ar entre o solo e a cobertura funciona como uma camada isolante, reduzindo a transferência de calor por convecção e elevando a temperatura do solo em aproximadamente 2 a 3 °C (Tarara, 2000; Abdul-Baki e Stommel, 2005; Abdrabbo et al., 2017). De acordo com El-Dolify et al. (2016) e Farrag et al. (2016), incrementos dessa magnitude na temperatura da zona radicular podem exercer efeitos positivos sobre o crescimento vegetativo e o rendimento das culturas.

O aumento da temperatura do solo também está associado a melhorias nas características biológicas e na fertilidade edáfica, uma vez que acelera processos microbiológicos envolvidos na transformação de nutrientes, como a amonificação e a nitrificação (Wilson e Jefferies, 1996). Esses processos favorecem a disponibilidade de nutrientes e promovem um ambiente mais propício ao desenvolvimento do sistema radicular e à absorção mineral (Medany et al., 2009). Nesse sentido, Abdrabbo et al. (2017) observaram maior acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em folhas de berinjela cultivadas sob cobertura plástica, atribuindo esse efeito ao aumento da temperatura do solo promovido por essa prática.

2.7 Respostas fotomorfológicas das plantas cultivadas sob coberturas plásticas coloridas de solo

Nos últimos anos, tem-se evidenciado a relevância da seleção adequada da cor de coberturas plásticas em sistemas de produção vegetal, uma vez que esse manejo promove alterações no microclima das plantas, modulando a quantidade e a qualidade espectral da radiação incidente. Essas modificações influenciam processos fisiológicos fundamentais, como a distribuição de fotoassimilados entre órgãos aéreos e radiculares, além de afetarem a fenologia, o crescimento, o desenvolvimento e o desempenho produtivo das plantas (Decoteau et al., 1988, Decoteau et al., 1990; Diaz-Perez, 2010; Gordon et al., 2010).

As plantas desenvolvem-se sob a influência da radiação solar direta e dos comprimentos de onda refletidos pelas superfícies do ambiente, os quais modulam a qualidade espectral da luz incidente. Essa radiação é percebida por diferentes classes de fotorreceptores, como os fitocromos, criptocromos e fototropinas, que convertem os sinais luminosos em respostas fisiológicas e moleculares, regulando o crescimento, o desenvolvimento e a adaptação das plantas ao ambiente luminoso (Fiorucci e Fankhauser, 2017; Paik e Huq, 2019). Além disso, as plantas respondem morfológicamente a várias cores em ambientes controlados por meio do sistema natural de regulação do crescimento, sendo o vermelho distante (FR), o vermelho (R), e o azul (B), as cores de luz mais influentes (Antonious e Kasperbauer, 2002; Kasperbauer e Loughrin, 2004; Shiukhy et al., 2015). Da mesma forma, a relação R/FR tem um efeito no fotoequilíbrio do fitocromo dentro da planta e está envolvida no desenvolvimento do cloroplasto, na regulação do alongamento do caule (Franklin e Quail, 2010; Casal, 2013), na qualidade do fruto (González et al., 2015), no alongamento da raiz (Salisbury et al., 2007; Costigan et al., 2011) e na tolerância a estressores bióticos e abióticos (Ballaré et al., 2012; Carvalho et al., 2011).

A distribuição espectral da luz refletida é capaz de modular a expressão gênica das plantas, influenciando diretamente a composição química dos tecidos em desenvolvimento e, conseqüentemente, a qualidade fisiológica e bioquímica. Alterações nas proporções de comprimentos de onda específicos podem regular a síntese e o acúmulo de metabólitos secundários, como flavonoides, compostos

fenólicos, antocianinas, vitaminas, taninos e outros antioxidantes, refletindo o papel central da luz como sinal ambiental na regulação metabólica das plantas (Legris et al., 2019; Jenkins, 2021; Bian et al., 2022; Hayes et al., 2023).

A qualidade espectral da luz refletida por superfícies vermelhas, caracterizada por baixas razões vermelho/vermelho-distante (R/FR) e maior proporção de radiação vermelha (R) e vermelho-distante (FR), atua como um importante sinal ambiental capaz de modular processos fisiológicos, morfológicos e bioquímicos nas plantas (Antonious e Kasperbauer, 2002). Por meio da sinalização mediada por fitocromos, essas alterações espectrais regulam a expressão gênica associada à fotomorfogênese e ao desenvolvimento do aparato fotossintético (Quail, 2002; Paik; Huq, 2019; Legris et al., 2019), promovendo respostas típicas de ambientes com competição luminosa, como alongamento do caule, expansão foliar e modulação do florescimento (Devlin et al., 2003; Casal, 2013). Ademais, a redistribuição de fotoassimilados sob baixas razões R/FR favorece o crescimento reprodutivo, resultando em maior tamanho e produtividade dos frutos (Kasperbauer, 2000; Locascio et al., 2005). A qualidade da luz também influencia o metabolismo secundário vegetal, regulando a biossíntese e o acúmulo de compostos fenólicos, flavonoides, antocianinas e outros antioxidantes, com reflexos diretos na qualidade química, nutricional e funcional dos tecidos vegetais (Jenkins, 2021; Bian et al., 2022). Contudo, tais respostas dependem da espécie, das condições ambientais e da intensidade e duração do sinal luminoso refletido (Hayes et al., 2023).

A luz refletida por coberturas plásticas azuis caracteriza-se pela elevada proporção de radiação azul e pelos baixos níveis de vermelho e vermelho-distante, promovendo alterações relevantes na qualidade espectral percebida pelo dossel das plantas. A radiação azul atua como um sinal ambiental central na regulação da fotomorfogênese, da biossíntese de clorofila e da abertura estomática, por meio da ativação de fotorreceptores como criptocromos e fototropinas, influenciando diretamente o crescimento e a eficiência fisiológica das plantas (Paik e Huq, 2019; Bian et al., 2022). Em função dessas respostas, maiores proporções de luz azul tendem a reduzir o alongamento do caule, favorecer maior alocação de biomassa e modular a arquitetura vegetal, embora tais efeitos sejam altamente dependentes da espécie e do contexto ambiental (Huché-Thélier et al., 2016; Hayes et al., 2023). Além

disso, a qualidade espectral enriquecida em azul influencia o metabolismo primário e secundário, promovendo alterações na síntese de pigmentos fotossintéticos (Bradburne et al., 1989) e no acúmulo de fitoquímicos de interesse funcional, como flavonoides, carotenoides e antocianinas, compostos diretamente associados à atividade antioxidante e à qualidade dos tecidos vegetais (Ebisawa et al., 2008, Taulavuori et al., 2013, 2017; Hayes et al., 2023). Entretanto, a magnitude dessas respostas fisiológicas e bioquímicas varia amplamente entre espécies, estádios de desenvolvimento e condições de cultivo, indicando que os efeitos agrônômicos da luz azul refletida ainda requerem maior aprofundamento experimental.

Coberturas plásticas de coloração clara, especialmente a branca, caracterizam-se pela elevada refletância da radiação incidente e por maiores razões vermelho/vermelho-distante (R/FR), o que resulta em aumento da quantidade de luz disponível ao dossel das plantas. Essa condição favorece a assimilação de carbono e pode elevar a eficiência fotossintética, promovendo alterações no crescimento e na produtividade vegetal (Kaiser et al., 2019; Zhen e Bugbee, 2020). A maior participação da radiação azul refletida por superfícies claras atua como sinal regulador do desenvolvimento, influenciando a arquitetura das plantas, com efeitos sobre alongamento do caule, emissão de brotações laterais e partição de biomassa entre parte aérea e sistema radicular (Pedmale et al., 2016; Fiorucci e Fankhauser, 2017). A maior proporção de luz azul refletida por coberturas brancas pode contribuir para a regulação do crescimento vegetal, resultando em plantas com caules mais curtos e maior desenvolvimento de brotações axilares (Tanada, 1984; Kasperbauer e Hunt, 1987). Além disso, a qualidade espectral associada às coberturas brancas pode modular o metabolismo primário e secundário, alterando o acúmulo de açúcares, pigmentos fotossintéticos e compostos antioxidantes, com reflexos diretos na qualidade nutricional e funcional dos tecidos vegetais (Carvalho e Folta, 2019; Kong e Zheng, 2024).

3 Referências

Abdrabbo MAA, Saleh SM, Hashem FA (2017) Eggplant production under deficit irrigation and polyethylene mulch. **Egyptian Journal of Applied Science** 32:148–161.

Abdul-Baki AA, Stommel JR (2005) Carotenoid accumulation in ripening fruits of red pepper under plastic film and open field production. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 53:1811–1816.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA Atlas da irrigação: uso da água na agricultura irrigada no Brasil. Brasília: ANA. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/atlasirrigacao/>.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).

Antonious GF, Kasperbauer MJ (2002) Color of mulches affects yield, root development, and leaf mineral content of bell pepper plants. **Journal of Plant Nutrition** 25:1267–1280.

Avilez AMA, Hernandez FBT, Carvalho Bispo R, Giovanelli LB (2018) Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no noroeste paulista. **Irriga** 23:171–188.

Bacin JM, Ferraz-Almeida R (2022) Viabilidade econômica do sistema MEIOSI associado à soja na renovação de canaviais. **Revista STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos** 40:36–42.

Ballaré CL, Mazza CA, Austin AT, Pierik R (2012) Canopy light and plant health. **Journal of Plant Physiology** 160:145–155.

Barbosa FdS, Coelho RD, Barros THdS, Lizcano JV, Fraga Júnior EF, Santos LdC, Leal DPV, Ribeiro NL, Costa JdO (2024) Sugarcane water productivity for bioethanol, sugar and biomass under deficit irrigation. **AgriEngineering** 6:1117–1132.

Bernardo S, Soares AA, Mantovani EC (2006) Manual de irrigação. Viçosa: Editora UFV.

Bradburne JA, Kasperbauer MJ, Mathis JN (1989) Reflected far-red light effects on chlorophyll and LHC-II contents under field conditions. **Plant Physiology** 91:800–803.

Braga Jr RLC, Xavier MA, Landell MGA (2023) Empresas produtoras estão se especializando na produção de MPB. **Cana Online**. Disponível em: <https://www.canaonline.com.br>.

Bian Z, Yang Q, Liu W (2022) Effects of light quality on plant growth and development. **Frontiers in Plant Science** 13:810939.

Byrt CS, Grof CP, Furbank RT (2011) C4 plants as biofuel feedstocks. **Journal of Integrative Plant Biology** 53:120–135.

Camilotti F, Andrioli I, Marques MO, Silva ARD, Tasso Júnior LC, Nobile FOD (2006) Atributos físicos de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola** 26:738–747.

- Casal JJ (2013) Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. **Annual Review of Plant Biology** 64:403–427.
- Castro P (2016) Fisiologia aplicada à cana-de-açúcar. Piracicaba: STAB.
- Carvalho RF, Campos ML, Azevedo RA (2011) The role of phytochrome in stress tolerance. **Journal of Integrative Plant Biology** 53:920–929.
- Carvalho SD, Folta KM (2014) Environmentally modified organisms – expanding genetic potential with light. **Critical Reviews in Plant Sciences** 33:486–508.
- Casarini DC, Cunha RDA, Maset Filho B (1987) Effects of irrigation with vinasse on soil microbiology. **Water Science and Technology** 19:167–176.
- Centro de Tecnologia Canavieira – CTC (2019) Tecnologias para renovação e implantação de canaviais. Piracicaba: CTC.
- Cherubin MR, Karlen DL, Cerri CE, Franco AL, Tormena CA, Davies CA, Cerri CC (2016) Soil quality indexing strategies for sugarcane expansion in Brazil. **PLoS ONE** 11:e0150860.
- Christofoletti CA, Escher JP, Correia JE, Marinho JFU, Fontanetti CS (2013) Sugarcane vinasse: environmental management implications of its use. **Waste management** 33:2752-2761.
- Coelho AP, Dalri AB, Faria RT, Landell PA, Palaretti LF (2018) Perfilhamento da cana-de-açúcar cultivada com e sem irrigação suplementar e plantada por mudas pré-brotadas: Um novo conceito. **Acta Iguazu** 7(4):71-84.
- Companhia Nacional de Abastecimento (2025) **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2025/2026, 3º levantamento**. Brasília: CONAB.
- Costigan SE, Warnasooriya SN, Humphries BA, Montgomery BL (2011) Root-localized phytochrome synthesis and root elongation. **Plant Physiology** 157:1138–1150.
- Daniels J, Roach BT (1987) Taxonomy and evolution. In: Heinz D (ed) Sugarcane improvement through breeding. **Elsevier**, New York, pp 7–84.
- Darouich HM, Pedras CMG, Gonçalves JM, Pereira LS (2014) Drip vs. surface irrigation: water saving and economic returns. **Biosystems Engineering** 122:74–89.
- Decoteau DR, Kasperbauer MJ, Daniels DD, Hunt PG (1988) Plastic mulch color effects on tomato growth. **Scientia Horticulturae** 34:169–175.
- Decoteau DR, Kasperbauer MJ, Hunt PG (1990) Bell pepper development over mulches of diverse colors. **HortScience** 25:460–462.
- Devlin PF, Yanovsky MJ, Kay SA (2003) Genomic analysis of shade avoidance in Arabidopsis. **The Plant Cell** 15:1555–1571.
- Dias MS et al. (2023) Calcium pyruvate attenuates water deficit effects in ratoon sugarcane. **Brazilian Journal of Biology** 83:e275046.

Diaz-Perez JC (2010) Bell pepper (*Capsicum annum* L.) grown on plastic film mulches: Effects on crop microenvironment, physiological attributes, and fruit yield. **HortScience** 45:1196-1204.

Dingre SK, Gorantiwar SD (2021) Gestão de déficit de irrigação com base na umidade do solo para cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) em ambiente semiárido. **Agricultural Water Management**, 245, 106549. doi:10.1016/j.agwat.2020.106549.

Doornbos J, Kassam AH (1979) Yield response to water. Rome: FAO. (FAO Irrigation and Drainage Paper 33).

Ebisawa M, Shoji K, Kato M, Shimomura K, Goto F, Yoshihara T (2008) Supplementary UV-B together with blue light at night increased quercetin content and flavonol synthase gene expression in leaf lettuce. **Environmental Control in Biology** 46:1–11.

El-Dolify MM, Abdrabbo MA, Abou El-Yazied A, Ideeb ME (2016) Effect of using soil conditioners on tomato yield and water use efficiency. **The Journal of Agricultural Science** 24:195–204.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (2018) **Sistema de produção da cana-de-açúcar**. Brasília.

Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, Fujita D, Basra SMA (2009) Plant drought stress. **Agronomy for Sustainable Development** 29:185–212.

Farrag K, Abdrabbo MAA, Hegab SAM (2016) Growth and productivity of potato under different irrigation levels and mulch types in the north west of the Nile Delta, Egypt. **Middle East Journal of Applied Sciences** 6:774–786.

Fioucci AS, Fankhauser C (2017) Plant strategies for enhancing access to sunlight. **Current Biology** 27:R931–R940.

Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (2017) Water for sustainable food and agriculture. Rome: FAO.

Franklin KA, Quail PH (2010) Phytochrome functions in Arabidopsis development. **Journal of Experimental Botany** 61:11–24.

Gomes J, Bajay MM (2017) Economicidade da idade de reforma de canaviais. Revista iPecege (dados de volume/páginas não informados no seu arquivo).

González C, Ré MD, Sossi ML, Valle EM, Boggio SB (2015) Tomato cv. ‘Micro-Tom’ as a model system to study postharvest chilling tolerance. **Scientia Horticulturae** 184:63–69.

Gordon G, Gfoshee III WG, Reed ST, Brown JE, Vinson III EL (2010) The effects of colored plastic mulches and row covers on the growth and yield of okra. **HortTechnology** 20:224–233.

Grecco KL, Miranda JH de, Silveira LK, Van Genuchten MT (2019) HYDRUS-2D simulations of water and potassium movement in drip irrigated tropical soil container cultivated with sugarcane. **Agricultural Water Management** 221:334–347.

Guo M, Li L, Wu J, Wang J (2018) Plastic film mulching for water use efficiency and crop yield on the Loess Plateau in China: a meta-analysis. **PLoS ONE** 13:e0197429.

Guzmán SM (2020) Fabric mulch groundcovers save water. **Citrus Industry**. Disponível em: <https://citrusindustry.net/2020/04/14/fabricmulchgroundcovers-save-water/>.

Hayes S, Schäfer E, Wang X (2023) Interplay between light and temperature signaling in plants. **Journal of Experimental Botany** 74:1567–1583.

Huché-Thélier L, Crespel L, Le Gourrierc J, Morel P, Sakr S, Leduc N (2016) Light signaling and plant responses to blue and UV radiations: perspectives for applications in horticulture. **Environmental and Experimental Botany** 121:22–38.

Inman-Bamber NG, Smith DM (2005) Water relations in sugarcane. **Field Crops Research** 92:185–202.

Instituto Agronômico de Campinas – IAC (2020) **Cana-de-açúcar: manejo, longevidade e sustentabilidade do canavial**. Campinas: IAC.

Jenkins GI (2021) The UV-B photoreceptor UVR8: from structure to physiology. **Plant, Cell & Environment** 44:798–810.

Jia Z, Huang Y, Liu S, Wang L (2018) Effects of plastic film mulching on soil physical properties and crop productivity: a review. **Agricultural Water Management** 201:374–382.

Kaiser E, Weiss A, Scharf K-D, Schopfer P (2019) Regulation of photosynthesis and growth by light quality. **Journal of Experimental Botany** 70:5477–5489.

Kasperbauer MJ (2000) Strawberry yield over red versus black plastic mulch. **Crop Science** 40:171–174.

Kasperbauer MJ, Hunt PG (1987) Soil color and surface residue effects of seedling light environment. **Plant and Soil** 97:295–298.

Kasperbauer MJ, Loughrin JH (2004) Butterbean seed yield, color and protein content are affected by photomorphogenesis. **Crop Science** 44:2123–2126.

Kong Y, Zheng Y (2024) Magic blue light: a versatile mediator of plant elongation. **Plants** 13:115.

Kumar R, et al. (2023) Drought and salinity stresses induced physio-biochemical changes in sugarcane: an overview of tolerance mechanism and mitigating approaches. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, art. 1225234. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1225234>

Landell MGA et al (2012) **Sistema MEIOSI de plantio de cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico (IAC). (Boletim Técnico).

Landell MGA, Campana MP, Figueiredo PAM, Xavier MA, Dinardo-Miranda LL (2021) Sistema MEIOSI associado a mudas pré-brotadas. **Revista STAB – Açúcar, Alcool e Subprodutos** 39:28–36.

Leal MRLV (2022) Agricultura digital e mecanização de precisão na cana-de-açúcar. Campinas: UNICAMP.

Leanasawat N, Kosittrakun M, Lontom W, Songsri P (2021) Physiological and agronomic traits of certain sugarcane genotypes grown under field conditions as influenced by early drought stress. **Agronomy** 11:2319.

Legris M, Ince YÇ, Fankhauser C (2019) Molecular mechanisms underlying phytochrome-controlled morphogenesis in plants. **Nature Communications** 10:5219.

Li Y, Song D, Dang P, Wei L, Qin X, Siddique KHM (2020) Combined ditch buried straw return technology in a ridge–furrow plastic film mulch system: implications for crop yield and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research** 199:104596.

Liu C, Zhou J, Chen L, Huang G, Wang C (2018) Effects of plastic film mulching on soil temperature, evaporation, and yield of maize in the Loess Plateau of China. **Agricultural Water Management** 208:283–293.

Locascio SJ et al (2005) Strawberry yield and quality responses to plastic mulch color. **HortScience** 40:166–169.

Medany MA, Abdrabbo MAA, Awany AA, Hassanien MK, Abou-Hadid AF (2009) Growth and productivity of mango grown under greenhouse conditions. **Horticulture Journal** 36:373–382.

Oliveira Filho ASB, Mello Prado R de, Teixeira GCM, Rocha AMS, Souza Junior JP de, Piccolo MC de C, Rocha JR (2021) Silicon attenuates the effects of water deficit in sugarcane by modifying physiological aspects and C:N:P stoichiometry and its use efficiency. **Agricultural Water Management** 255:107006.

Paik I, Huq E (2019) Plant photoreceptors: multi-functional sensory proteins and their signaling networks. **Trends in Plant Science** 24:679–693.

Pedmale UV, Huq E, Shulman D, Waters MT, Schauburger S, Chen M, Finlayson SA, Wang X, Quail PH (2016) Cryptochromes interact directly with PIFs to control plant growth in limiting blue light. **Cell** 164:233–245.

Pereira LS, Paredes P, Hunsaker DJ et al (2021) Standard single and basal crop coefficients for field crops: updates and advances to the FAO56 method. **Agricultural Water Management** 243:106466.

Prasara-A J, Gheewala SH (2016) Sustainability of sugarcane cultivation: case study of selected sites in north-eastern Thailand. **Journal of Cleaner Production** 134:613–622.

Quail PH (2002) Phytochrome photosensory signalling networks. **Nature Reviews Molecular Cell Biology** 3:85–93.

Rudorff BFT et al (2010) Sugarcane harvest mapping in Brazil using multitemporal MODIS imagery. **Remote Sensing of Environment** 114:2169–2179.

Salisbury FJ, Hall A, Grierson CS, Halliday KJ (2007) Phytochrome coordinates Arabidopsis shoot and root development. **The Plant Journal** 50:429–438.

Shiukhy S, Raeini-Sarjaz M, Chalavi V (2015) Colored plastic mulch microclimates affect strawberry fruit yield and quality. **International Journal of Biometeorology** 59:1061–1066.

Shukla R et al (2017) Water footprint and sustainability assessment of sugarcane cultivation in India. **Ecological Indicators** 81:294–302.

Silva MA, Jadoski SO, Maggi MF, Santos LNS (2018) Irrigação e fertirrigação na cultura da cana-de-açúcar: aspectos fisiológicos e produtivos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 22:475–481.

Silva VPRA, Borges CJR, Albuquerque WG (2014) Water requirements of sugarcane grown in tropical environment. *Semina*: **Ciências Agrárias** 35:625–632.

Singh R, Singh A, Singh S (2020) Drip irrigation and fertigation effects on sugarcane productivity and water use efficiency: a global review. **Agricultural Water Management** 231:106024.

Sousa Ferreira T, Cunha FF da, Ferreira LB, Costa FM, Silva Neto E da (2020) Desenvolvimento inicial da cana-soca sob lâminas de irrigação de salvamento. **Agrarian** 13:493–503.

Sukyai P et al (2016) Production of bioethanol from sugarcane bagasse using acid pretreatment and enzymatic hydrolysis. **Biotechnology for Biofuels** 9:63.

Taiz L, Zeiger E, Møller IM, Murphy A (2017) **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed.

Tanada T (1984) Interaction of green and red light with blue light on the dark closure of Albizzia pinnules. **Physiologia Plantarum** 61:35–37.

Tarara JM (2000) Microclimate modification with plastic mulch. **HortScience** 35:222–228.

Taulavuori K, Julkunen-Tiitto R, Hyöky V, Taulavuori E (2013) Blue mood for superfood. **Natural Product Communications** 8:791–794.

Taulavuori E, Taulavuori K, Holopainen JK, Julkunen-Tiitto R, Acar C, Dincer I (2017) Targeted use of LEDs in improvement of production efficiency through phytochemical enrichment. **Journal of the Science of Food and Agriculture**

Teixeira GCM, Rocha AMS, Oliveira KS, Santos Sarah MM dos, Oliveira Filho ASB de, Mello Prado R de, Palaretti LF (2020) Silício na mitigação dos estresses por deficiência

de manganês e pelo déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Científica** 48:170–187.

Tian Y, Su DR, Li FM, Li XL (2003) Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas. **Field Crops Research** 84:385–391.

Tormena CA, Roloff G, Sá JCM (1998) Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 22:301–309.

Vitti AC, Cantarella H, Trivelin PCO, Rossetto R, Dinardo-Miranda LL, Vasconcelos ACM, Landell MGA (2010) **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas 1: 239-270.

Xiukang W, Zhanbina L, Yingying X (2015) Effects of mulching and nitrogen on soil temperature, water content, nitrate-N content and maize yield in the Loess Plateau of China. **Agricultural Water Management** 161:53–64.

Wang QJ, Horton R, Shao MA (2003) Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution. **Soil Science** 168:671–676.

Wilson DJ, Jefferies RL (1996) Nitrogen mineralization, plant growth and goose herbivory in an arctic coastal ecosystem. **Journal of Ecology** 85:841–851.

Zhang W, Tian Y, Sun Z, Zheng C (2021) How does plastic film mulching affect crop water productivity in an arid river basin? **Agricultural Water Management** 258:107218.

Zhen S, Bugbee B (2020) Substituting far-red for traditionally defined photosynthetic photons results in equal canopy quantum yield for CO₂ fixation and increased photon capture. **Frontiers in Plant Science** 11:581156.

Zambrano JL, Cartagena Y, Sangoquiza C, Pincay A, Parra AR, Maiguashca J, Rivadeneira JL, Subía C, Park CH (2024) Plastic mulching as a strategy for mitigating drought stress in maize. **Water** 16:1033.