



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

GUSTAVO SANTOS SILVA

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UM SISTEMA
AGROFOTOVOLTAICO**

RIO LARGO – AL
2025

GUSTAVO SANTOS SILVA

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UM SISTEMA
AGROFOTOVOLTAICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

ORIENTADOR

Prof. Dr. Marcos Alex dos Santos

RIO LARGO – AL

2025

Catlogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S586m Silva, Gustavo Santos.

Modelagem do crescimento de cana-de-açúcar em um sistema agrofotovoltaico. / Gustavo Santos Silva. – 2025.

39 f.: il.

Orientador(a): Marcos Alex dos Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Graduação em Agronomia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2025.

Inclui bibliografia

1. Sombreamento. 2. Simulação agrícola. 3. Calibração de modelo. 4. Desenvolvimento vegetativo. I. Título.

CDU: 633.61

Folha de Aprovação

AUTOR: GUSTAVO SANTOS SILVA

MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UM SISTEMA AGROFOTOVOLTAICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovado em: 16/04/2025
Conceito: 10,0

Prof. Dr. Marcos Alex dos Santos, Universidade Federal de Alagoas
(Orientador)

Banca examinadora:

Prof. Dr. Francisco Dirceu Duarte Arraes, Instituto Federal Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Ricardo Araujo Ferreira Junior, Universidade Federal de Alagoas
(Examinador Interno)

Aos meus pais Sebastião Fortunato Silva e Telma Santos Silva, que sempre estiveram ao meu lado, iluminando meu caminho com amor e sabedoria. Sou profundamente grato por cada passo que me ajudaram a dar. Este sucesso é tão deles quanto meu.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sustentar minha mente e espírito, acalmar meu coração e permitir que eu alcançasse horizontes que, por vezes, pareciam inalcançáveis;

À minha amada mãe, Telma Santos Silva, por ser meu porto seguro, a personificação do lar, cuja proteção e ensinamentos moldaram o ser humano que hoje sou;

Ao meu querido pai, Sebastião Fortunato Silva, pilar central de nossa família e exemplo de integridade, que sempre me incentivou a enfrentar cada batalha com coragem;

A Joyce Herculano Lopes, por caminhar ao meu lado durante toda essa jornada, oferecendo apoio constante e iluminando meus dias com sua presença;

Ao meu orientador, professor Dr. Marcos Alex dos Santos pela confiança, ensinamentos e amizade que enriqueceram este percurso;

Ao professor Dr. Ricardo Araújo Araujo Ferreira Junior, que com seus conhecimentos e ensinamentos suavizou os desafios da pesquisa.

Aos professores do Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia: Iêdo Teodoro, Guilherme Bastos, Alexsandro Almeida, André Carvalho, Gustavo Lyra e Ivomberg Dourado pelos ensinamentos e incentivos;

Ao corpo docente do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias por terem contribuído em minha formação;

Ao meu amigo, Marcos Antonio Martins Feitosa, pela valiosa colaboração nas avaliações do experimento, independentemente das condições climáticas;

Aos meus amigos de turma: Alan Douglas Fernandes de Lima, Ana Beatriz Beserra de Andrade, Caio Vítor da Silva Anjos, Gabrielle Ferreira de Lira, Laysa Pollyanna dos Santos e Mickelly Vitória Silva Lira de Mélo, pela parceria e momentos compartilhados que tornaram esta trajetória ainda mais leve;

A Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) pelas concessões de bolsas;

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que este sonho se concretizasse, o meu sincero e profundo agradecimento.

“A simplicidade é o último grau de sofisticação.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

A cana-de-açúcar desempenha um papel crucial na economia brasileira, sendo a principal fonte de açúcar e etanol e desempenha um papel importante na matriz energética e na geração de empregos. Este estudo investigou os impactos do sistema agrofotovoltaico (SAF) no crescimento da cultura da cana-de-açúcar e uso do modelo DSSAT/CANEGRO para simular o crescimento da cana-de-açúcar nos dois ambientes: SAF e ambiente de referência sem os efeitos dos painéis solares sobre a cultura (REF). O estudo foi conduzido em uma área experimental de cultivo comercial da Usina Santa Clotilde, em Rio Largo, Alagoas, onde se encontra instalada uma estrutura com painéis fotovoltaicos sobre a cana-de-açúcar (SAF). O período de avaliação foi de 19/09/22 a 30/09/2023. Os resultados indicaram impactos positivos do SAF no crescimento da cultura. O sombreamento parcial proporcionado pelos painéis solares resultou em um índice de área foliar mais elevado e maior altura das plantas em comparação com a área sem sombreamento. O modelo DSSAT/CANEGRO apresentou precisão e acurácia satisfatórias para o índice de área foliar (IAF) no sistema SAF ($r^2 = 0,89$, RMSE = 0,55 e $d = 0,94$), mas teve menor exatidão na estimativa da altura (RMSE = 101,23, $d = 0,78$). No sistema referência (REF), a predição da altura pelo DASSAT foi mais precisa ($r^2 = 0,81$, RMSE = 56,57 e $d = 0,89$), enquanto a estimativa do IAF apresentou acurácia ligeiramente inferior ($d = 0,81$, RMSE = 0,88). Para o número de perfilhos, o modelo demonstrou baixo desempenho em ambos os sistemas, com r^2 próximos de zero e d inferior a 0,6. Para a produtividade da cana-de-açúcar, observou-se diferenças significativas ($p < 0,05$) para a massa de folhas, palmito e colmos (TCH) entre os sistemas avaliados, evidenciando a influência do sombreamento dos painéis solares no desempenho da cultura da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Sombreamento; simulação agrícola; calibração de modelo; desenvolvimento vegetativo;

ABSTRACT

Sugarcane plays a crucial role in Brazilian economy, serving as the primary source of sugar and ethanol, and contributing significantly to the country's energy matrix and employment generation. This study investigated the impacts of the agrophotovoltaic system (SAF) on sugarcane crop growth, as well as the use of the DSSAT/CANEGRO model to simulate sugarcane development in two environments: the SAF system and a reference environment without the effects of solar panels on the crop (REF). The study was conducted in a commercial cultivation experimental area at the Santa Clotilde Mill, located in Rio Largo, Alagoas, where a structure with photovoltaic panels is installed above the sugarcane crop (SAF). The evaluation period extended from September 19, 2022, to September 30, 2023. The results indicated positive impacts of SAF on crop growth. The partial shading provided by the solar panels resulted in a higher leaf area index (IAF) and greater plant height compared to the unshaded area. The DSSAT/CANEGRO model demonstrated satisfactory precision and accuracy for IAF in the SAF system ($r^2 = 0.89$, RMSE = 0.55, and $d = 0.94$), but showed lower accuracy in height estimation (RMSE = 101.23, $d = 0.78$). In the reference system (REF), height prediction by DSSAT was more accurate ($r^2 = 0.81$, RMSE = 56.57, and $d = 0.89$), while IAF estimation showed slightly lower accuracy ($d = 0.81$, RMSE = 0.88). For the number of tillers, the model performed poorly in both systems, with r^2 values close to zero and d values below 0.6. Regarding sugarcane yield, significant differences ($p < 0.05$) were observed in the mass of leaves, apical meristem (heart), and stalks (TCH) between the evaluated systems, highlighting the influence of solar panel shading on sugarcane crop performance.

Keywords: Shading; crop simulation; model calibration; vegetative development.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Esquema da relação entre modelagem empírica e mecanística (Adaptado de THORNLEY; JOHNSON, 2000)..... 18
- Figura 2** - Esquema da base de dados, a aplicação, e os componentes de software e suas aplicações nos modelos de culturas para uso no DSSAT. (Adaptado de JONES et al., 2003)..... 21
- Figura 3** - Imagem aérea do sistema agrofotovoltaico, obtida por drone (modelo DJI Air 2S), utilizando câmera RGB, aos 281 DAC (dias após corte)..... 23
- Figura 4** - Particionamento das canas na avaliação de produtividade, onde 1, 2 e 3 representam, respectivamente, folhas, palmitos e colmos..... 26
- Figura 5** - Variação temporal (data, dias após o corte DAC ou graus-dias acumulados GD) do índice de área foliar observado e simulado pelo modelo DSSAT/CANEGRO no sistema SAF e REF..... 31
- Figura 6** - Variação temporal (data, dias após o corte DAC ou graus-dias acumulados GD) da altura das plantas observada e simulada pelo modelo DSSAT/CANEGRO no sistema SAF e REF..... 32
- Figura 7** - Variação temporal (data, dias após o corte DAC ou graus-dias acumulados GD) de perfilhamento observado e simulado pelo modelo DSSAT/CANEGRO no sistema SAF e REF..... 33
- Figura 8** - Relação entre os valores observados e estimados pelo modelo DSSAT/CANEGRO para o SAF e REF..... 35
- Figura 9** - Boxplots da produtividade de colmos, palmitos e folhas em área sombreada (SAF) e área não sombreada (REF)..... 36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Parâmetros	Fenológicos	e	de	Crescimento	
		Utilizados.....					28
Tabela 2		Cálculo	de	desempenho	do	modelo	
		DSSAT/CANEGRO					35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CANEGRO	Modelo de Crescimento da Cana-de-Açúcar integrado ao DSSAT
CECA	Campus de Engenharia e Ciências Agrárias
DAC	Dias Após Corte
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
GD	Graus-Dia
GD-CANA	Programa de cálculo de graus-dia para a cultura da cana-de-açúcar
IAF	Índice de Área Foliar
REF	Área sem sombreamento
RMSE	Root Mean Square Error
SAF	Sistema agrofotovoltaico
TCH	Toneladas de colmo de cana por hectare
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Cana-de-açúcar.....	16
2.2	Sistema Agrofotovoltaico.....	16
2.3	Modelagem na Agricultura	18
2.4	DSSAT/CANEGRO	19
3	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1	Descrição da Área Experimental.....	22
3.2	Índice de Área Foliar.....	22
3.3	Altura do Dossel e Perfilamento	24
3.4	Soma Térmica Acumulada.....	24
3.5	Produtividade e Biomassa da Parte Aérea.....	25
3.6	Testes de Student.....	26
3.7	Dados de Entrada no Modelo DSSAT.....	26
3.8	Índices Estatísticos.....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Índice de Área Foliar.....	30
4.2	Altura das Plantas.....	32
4.3	Perfilamento.....	33
4.4	Desempenho do Modelo DSSAT/CANEGRO.....	34
4.5	Produtividade Agrícola.....	36
5	CONCLUSÕES	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O avanço por busca de energia sustentável tem impulsionado à ampliação de áreas instaladas com painéis solares, de modo que a competitividade pelo uso da terra com a agricultura torna-se, cada vez mais, um problema iminente. A utilização de uma mesma área para a produção agrícola e para a geração de energia fotovoltaica, denominada de sistemas agrofotovoltaicos (SAFs), tem se destacado como uma estratégia promissora para mitigar deste problema. Além disso, diversos estudos (Stefani et al., 2022; Manita, 2022) demonstram que o SAF pode aumentar significativamente a eficiência no uso da terra, proporcionando benefícios como a criação de um microclima favorável ao crescimento das culturas, incluindo a redução da temperatura e da transpiração foliar, que, em alguns casos, podem resultar em um aumento da produtividade agrícola (Amaducci et al., 2018; LI et al., 2010)

A cana-de-açúcar desempenha um papel fundamental na economia brasileira como uma das principais fontes de açúcar e etanol, além de contribuir para a matriz energética do país e para a geração de empregos. Na safra 2023/24, por exemplo, a produção no Brasil alcançou 713,2 milhões de toneladas, conforme o 4º levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), representando um novo recorde na série histórica (CONAB, 2024). A área cultivada com cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira, na safra 2022/23, está estimada em Cerca de 8,1 milhões de hectares (CONAB, 2023). Devido à importância econômica e ambiental é crucial o desenvolvimento de práticas agrícolas que aumentem sua produtividade de forma sustentável.

A aplicação do sistema agrofotovoltaico na cultura da cana-de-açúcar pode representar um avanço significativo no campo da agricultura sustentável. Até o momento, este trabalho é o primeiro estudo de SAF com a cultura da cana-de-açúcar no Brasil e no mundo, destacando-se como um pioneiro nesse aspecto. A escolha dessa cultura para implementação do SAF se deve a sua relevância econômica e à necessidade de aumentar sua eficiência produtiva em um contexto de crescente demanda por biocombustíveis e energia renovável.

A interação entre a planta e seu meio (solo e atmosfera) é complexa, envolvendo conhecimento em diversos campos da ciência. O entendimento, especialmente numérico, dessas interações pode ser obtido por modelos mecânicos de crescimento de cultura (Liu; Allsopp, 1996; Jones et al., 2003); esses modelos buscam sintetizar o estado da arte dos processos físicos, químicos e biológicos envolvidos nessas interações e permitem realizar simulações para diferentes condições de contorno e características da planta (Soler, 2004; Pinheiro et al., 2021). Por exemplo, a análise de todo o sistema de produção pode ser feita usando modelos

mecanísticos antes da implantação, possibilitando a correção de falhas durante a fase de planejamento, reduzindo custos com manejos e demais setores produtivos (Mello e Caimi, 2008).

O modelo DSSAT/CANEGRO é um dos principais modelos de crescimento e desenvolvimento de cana-de-açúcar. O uso deste modelo em sistema agrofotovoltaico ainda não foi avaliado. Sua capacidade de representar as interações complexas entre a cultura, o ambiente e as práticas agrícolas o tornam uma escolha ideal para este estudo. Por meio da simulação com esse modelo, buscamos compreender os impactos do sombreamento fornecido pelo SAF no crescimento e na produtividade da cana-de-açúcar, contribuindo assim para o avanço do conhecimento e para a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma planta tropical perene da família Poaceae, originária do sudeste Asiático, sendo explorada economicamente em regiões tropicais e subtropicais, especialmente entre as latitudes 35° N e 35° S (Doorenbos & Kassam, 1979). Dentre os elementos meteorológicos, a irradiação solar, temperatura e precipitação são os mais importantes para o desenvolvimento da cana-de-açúcar (Segato et al., 2006).

A cana-de-açúcar se desenvolve em forma de touceira, com perfilhos em sua base. Seu sistema radicular é altamente ramificado, com profundidade efetiva variando de 0,30 a 0,40 m (Korndörfer; Primavesi; Deuber, 1989; Orsolini et al., 2023) em função do tipo de solo, indicando adaptação para extração de água e nutrientes em diferentes profundidades do solo. Desse modo, é comum observar estudos demonstrando a capacidade da planta de tolerar diferentes condições de escassez de água no solo (James, 2004). Durante seu ciclo vegetativo, não há acumulação significativa de sacarose, pois a planta utiliza os fotoassimilados disponíveis para o crescimento (Marin et al., 2009). No entanto, a maturação da cana-de-açúcar ocorre em condições restritivas ao crescimento, como temperaturas mais baixas e períodos de seca moderada, é quando há aumento do teor de sacarose nos colmos (Marin et al., 2009).

2.2 Sistema Agrofotovoltaico

A produção de energia solar fotovoltaica (PV), que utiliza painéis para converter a luz do sol em eletricidade, tem sido integrada à agricultura por meio dos chamados sistemas agrofotovoltaicos (SAFs). Esses sistemas possibilitam a utilização simultânea da terra para a geração de energia solar e a produção agrícola, maximizando a eficiência do espaço disponível e fomentando uma utilização mais sustentável do solo. Esse sistema tem se destacado como uma abordagem promissora para otimizar o uso da terra, especialmente em regiões com limitações para a expansão agrícola (Wang et al., 2020). Nesse sentido, a integração de SAFs não apenas contribui para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) e o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) (Organização das Nações Unidas, 2015), mas também fortalece a resiliência das comunidades agrícolas ao promover uma produção mais sustentável.

A concepção inicial dos sistemas agrofotovoltaicos remonta ao ano de 1980, com os trabalhos pioneiros do físico alemão Adolf Goetzberger e do engenheiro Armin Zastrow, que vislumbraram a possibilidade de integrar a geração de energia solar com a produção agrícola em um mesmo espaço. Posteriormente, em 2004, o professor japonês Akira Nagashima aprofundou os estudos sobre o tema e introduziu o conceito de solar sharing – ou compartilhamento da luz solar – para descrever a convivência planejada entre os painéis fotovoltaicos e as culturas agrícolas abaixo deles. Mais recentemente, em 2017, a França deu um passo significativo ao implementar sistematicamente esse tipo de sistema, alinhando-se às diretrizes dos ODS e consolidando os SAFs como uma estratégia eficaz de desenvolvimento sustentável.

No contexto específico da cultura da cana-de-açúcar, a adoção de SAFs oferece a oportunidade de aumentar a produtividade por unidade de área, uma vez que a cultura pode se beneficiar da sombra proporcionada pelos painéis solares, o que reduz a evapotranspiração e melhora as condições microclimáticas (Motta et al., 2022). Adicionalmente, a energia solar gerada pode ser integrada às operações da usina, contribuindo para a autossuficiência energética e diminuindo a dependência de fontes não renováveis (Huang et al., 2019).

Outro benefício dos SAFs é a capacidade de diversificar a produção agrícola em um mesmo espaço, o que pode fortalecer a segurança alimentar e a sustentabilidade do sistema produtivo (Chen et al., 2020). A combinação entre cultivos agrícolas e a produção de energia solar não apenas aumenta a eficiência do uso da terra, mas também pode melhorar a resiliência do sistema agrícola, reduzindo os riscos relacionados a eventos climáticos extremos e a flutuações de mercado (Gong et al., 2021). Nesse sentido, os SAFs não são apenas uma solução para a produção sustentável de energia, mas também uma ferramenta crucial para promover a agricultura sustentável e a segurança alimentar (Liu et al., 2018).

Em resumo, a integração de sistemas agrofotovoltaicos com a cultura da cana-de-açúcar e outras culturas agrícolas apresenta um grande potencial para aumentar a eficiência do uso da terra, promover a sustentabilidade ambiental, auxiliar na solução da crise energética e contribuir para a segurança alimentar. No entanto, é importante destacar a necessidade de mais pesquisas para avaliar os impactos dessa integração em diferentes contextos agrícolas e climáticos, a fim de desenvolver diretrizes e melhores práticas para sua implementação em larga escala.

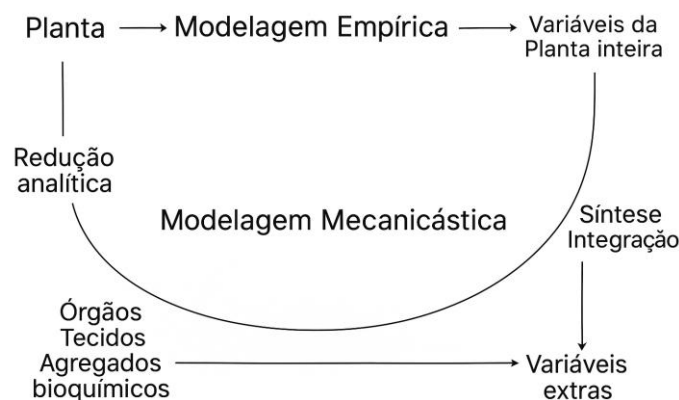
2.3 Modelagem na agricultura

Modelos são representações matemáticas que descrevem sistemas complexos, permitindo simular e compreender o comportamento de diferentes processos naturais. Segundo Jame & Cutforth (1996), um modelo é composto por uma série de algoritmos que descrevem um sistema, sendo capaz de simular o desenvolvimento e o crescimento das culturas agrícolas ao nível de desenvolvimento de seus componentes, como folhas, raízes e caule. Dessa forma, um modelo de crescimento não apenas estima a biomassa total, mas também oferece informações quantitativas sobre os processos envolvidos no desenvolvimento vegetal.

Thornley e Johnson (2000) classificam os modelos em dois tipos principais: empíricos e mecanísticos. Os modelos empíricos consistem em descrições diretas de dados observados e, embora úteis, são geralmente mais simples e menos generalizáveis. Já os modelos mecanísticos são baseados em processos físicos e fisiológicos, sendo mais complexos, porém oferecem maior capacidade de manipulação, compreensão e melhoria dos sistemas simulados. Wallach et al., (2001) reforçam que esses modelos mecanísticos são amplamente utilizados na agricultura para diversas finalidades, como previsão de safras, monitoramento de culturas e apoio à tomada de decisões no manejo agrícola.

Um exemplo prático dessa aplicação foi apresentado por Liu e Bull (2001) (Fig. 01), ao utilizarem o modelo QCANE para simular a biomassa e o acúmulo de sacarose na cultura da cana-de-açúcar.

Figura 1. Esquema da relação entre modelagem empírica e mecanística.



Fonte: Adaptado de Thornley; Johnson, 2000.

Além disso, os modelos de simulação têm se mostrado ferramentas úteis para o estudo e compreensão dos processos físicos, químicos e biológicos da interação entre plantas e

ambiente, conforme destacado por Soler (2004). Monteith (1996) complementa afirmando que os modelos de simulação de cultura consistem em conjuntos de equações que estimam crescimento, desenvolvimento e produtividade com base em coeficientes genéticos e variáveis ambientais, permitindo análises mais abrangentes, como fluxo de água no solo, fotossíntese e balanço de nutrientes.

O’Leary (2000) ressalta que, dada a complexidade da natureza, os estudos acadêmicos na agricultura frequentemente se concentram em pequenas áreas de interesse, acumulando conhecimento de forma gradual. No entanto, a investigação em sistemas reais é limitada pelos altos custos operacionais e pela necessidade de equipes especializadas. Nesse contexto, a modelagem matemática surge como uma alternativa viável, exigindo um alto nível de conhecimento técnico para descrever com precisão os processos envolvidos, conforme reforçado por Soler (2004).

De acordo com Monteith (1996), os modelos de simulação de cultura são construídos por um conjunto de equações para estimar o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura, a partir de coeficientes (ou parâmetros) genéticos e variáveis ambientais. Estes modelos permitem avaliar a evolução temporal de diversos componentes da planta. Devido à complexidade deste sistema e ao estado incompleto do conhecimento presente, torna-se impossível representar completamente o sistema em termos matemáticos e por isto, modelos agrícolas são imagens relativamente simplificadas da realidade (Barros, Allan Cunha, 2011).

2.4 DSSAT/ CANEGRO

O modelo DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) é uma plataforma computacional que integra diversos modelos de crescimento de culturas agrícolas com o objetivo de simular, de forma detalhada, os efeitos das condições climáticas, características do solo, práticas de manejo e genótipos sobre o desenvolvimento e a produtividade das culturas. Essa ferramenta é amplamente utilizada para apoiar a tomada de decisão na agricultura, permitindo a avaliação de cenários e a previsão de rendimento. Mais detalhes sobre o modelo podem ser obtidos em Singels et al. (2010), Nassift et al. (2012) e em Coelho et al. (2020).

O CANEGRO (sugarcane growth model) foi originalmente desenvolvido pela Associação Sul-Africana do Açúcar (Inman-Bamber, 1995) com o intuito de simular o

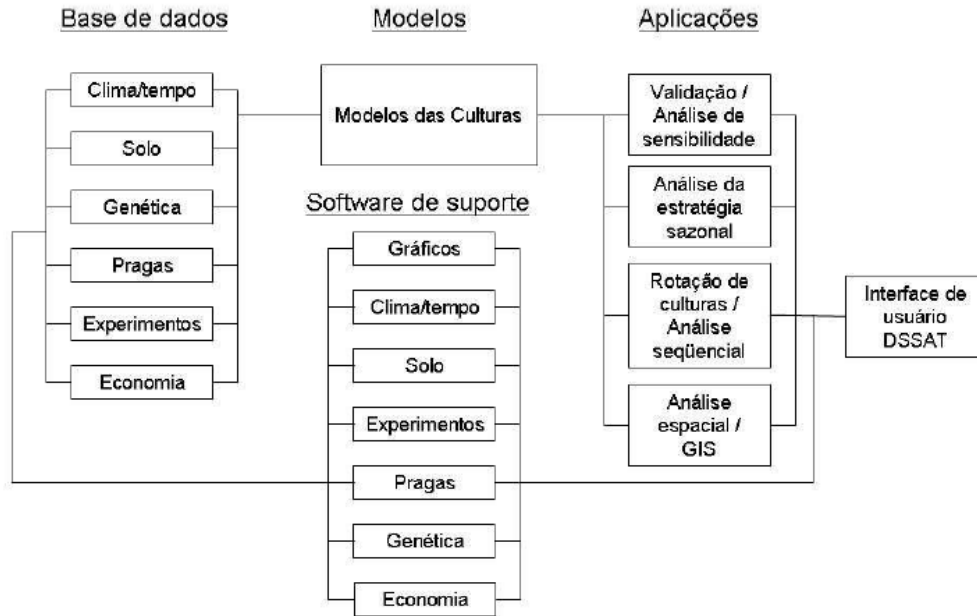
crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar em resposta a fatores ambientais e práticas de manejo. Posteriormente, esse modelo foi incorporado ao DSSAT, passando a fazer parte de uma suíte de ferramentas integradas que vêm sendo amplamente utilizadas em países como Brasil, África do Sul, Índia e Austrália (Singels et al., 2010). A integração ao DSSAT permitiu a padronização da execução do modelo CANEGRO, que passou a utilizar os bancos de dados, interfaces e rotinas de simulação do sistema.

Desde seu lançamento em 1989, o DSSAT/CANEGRO passou por diversas atualizações. Em 2019, o código do modelo foi disponibilizado no GitHub (<https://github.com/DSSAT>), tornando-se oficialmente um software de código aberto. Atualmente, encontra-se na versão 4.8.5, com uma grande equipe internacional envolvida em seu contínuo desenvolvimento, dada sua relevância para a agricultura. O software pode ser acessado mediante solicitação no site oficial do DSSAT.

O modelo DSSAT/CANEGRO tem sido utilizado para diversos fins, por exemplo, para simular o crescimento e partição de biomassa seca da cana-de-açúcar (Singels e Bezuidenhout, 2002), assim como densidade de perfilhos e interceptação de luz (Bezuidenhout et al., 2003), extração de água, crescimento e acúmulo de sacarose em condições de estresse hídrico (Singels et al., 2010). No Brasil, o DSSAT foi utilizado para simular variáveis de crescimento e produção de diferentes variedades de cana-de-açúcar em São Paulo (Nassif et al., 2012), analisar o impacto das mudanças climáticas na produtividade da cana-de-açúcar na Bahia (Silva, 2012) e São Paulo (Jones et al., 2015).

As simulações com o DSSAT/CANEGRO baseiam-se no fornecimento de dados agrupados em três conjuntos principais: variáveis meteorológicas, propriedades físicas do solo e práticas de manejo da cultura, como variedade, espaçamento entrelinhas, data de plantio, densidade de plantas e aplicação de fertilizantes. Conforme ilustrado na Figura 2, o sistema DSSAT organiza suas operações a partir da interligação entre diferentes bases de dados (clima, solo, genética, pragas, experimentos e economia), os modelos de culturas e um conjunto de aplicações analíticas, como validação de dados, simulações sazonais, rotação de culturas e análise espacial (GIS). O software de suporte conecta todas essas partes, garantindo a integração e consistência dos dados para geração de simulações agrícolas robustas. A interface de usuário final permite acesso facilitado às funções do sistema, inclusive para usuários sem conhecimentos avançados em programação.

Figura 2. Esquema da base de dados, a aplicação, e os componentes de software e suas aplicações nos modelos de culturas para uso no DSSAT.



Fonte: Adaptado de Jones et al., 2003.

Os parâmetros relacionados aos processos biofísicos, que são simulados pelo modelo, também são necessários e variam para cada variedade e com o ambiente. Estes parâmetros podem ser obtidos experimentalmente, através de experimentos específicos que avaliam cada processo simulado pelo modelo, ou através de modelagem inversa, nos quais os parâmetros são estimados através da comparação de alguma variável de estado simulada pelo modelo com o valor obtido experimentalmente.

Os dados meteorológicos diários requeridos pelo modelo DSSAT/CANEGRO são temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), irradiação solar global ($\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), umidade relativa (%), velocidade do vento (m s^{-1}) e precipitação (mm). Os dados de propriedades físicas do solo necessários são densidade do solo, coloração, declividade, e porcentagens de areia, argila e silte. No modelo, esses dados são inseridos no arquivo de solo.

Os parâmetros das cultivares estão relacionados principalmente à partição da biomassa, desenvolvimento do dossel (folhas e perfilhos) e fases fenológicas. Espera-se que os parâmetros do ecótipo variem menos com as cultivares e sejam mais difíceis de ajustar, porque os dados não estão prontamente disponíveis (Singels et al., 2008). No total existem 31 parâmetros ajustáveis de ecótipo e 20 de cultivares (Silva, 2012), Alguns destes parâmetros de ecótipo que podem ser calibrados são o máximo e mínimo coeficientes de extinção de radiação do dossel; Sensibilidade de particionamento da sacarose ao estresse hídrico; Número de folhas (incluindo

folhas mortas ainda fixadas) (n° folhas); Coeficiente de população de colmos, em condições ideais, em função de graus dias; Máximo comprimento de folhas por número de folhas (cm); Máximo comprimento absoluto de folha (cm) (Singels et al., 2008).

Alguns parâmetros ajustáveis de cultivares são fração máxima de incremento de massa seca, que pode ser atribuído à massa seca da parte aérea ($t t^{-1}$); Fração do incremento diário de massa seca aérea, particionada para o colmo em altas temperaturas em uma cultura madura ($t t^{-1}$); Particionamento de sacarose: temperatura em que o particionamento de incremento de massa de colmo sem estresse para sacarose é 50% do valor máximo ($^{\circ}C$); Graus-dia para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento; População de perfilhos máxima (colmos m^{-2}); Graus-dia para emergência da soqueira (GD) (Singels et al., 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área experimental

O trabalho foi realizado em uma área experimental de socaria (2ª folha) (Fig. 03), de cana-de-açúcar (variedade RB92579), em cultivo de sequeiro, com delimitação de 2,2 ha. A área está localizada em Rio Largo, Alagoas, ao lado do *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA) da UFAL. O solo da área é um Latossolo Amarelo coeso argissólico, com topografia suave. O clima é classificado como úmido megatérmico, com deficiência de água moderada no verão e grande excesso de água no inverno (Souza et al., 2004).

O plantio foi realizado em 16/09/2021, de forma mecanizada, com espaçamento duplo (1,5 x 0,5 m). Foram utilizados calcário (5 t de calcário dolomítico), adubo de fundação (0,6 t de adubo de fundação, na proporção de 10% de N, 20% de P₂O₅ e 20% de K₂O), inseticida (Altacor, 0,3 L ha⁻¹), nematicida (Quartzo, 0,2 L ha⁻¹) e fungicida (Authority, 0,6 L ha⁻¹) no preparo do solo. O primeiro corte foi realizado no dia 18/09/2022, manualmente, sem despalha a fogo. As medições de crescimento realizadas neste trabalho correspondem ao segundo ciclo da cultura, de 19/09/22 a 30/09/2023.

3.2 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) é uma grandeza física que quantifica a relação entre área foliar de uma planta e sua área de solo ocupada. Tomando-se as plantas contidas em um metro linear, o IAF médio dessas plantas pode ser obtido por:

$$IAF = \frac{AF_t}{A_{sl}} \quad 1$$

em que, AF_t ($m^2 m^{-2}$) é a área foliar total de todas as plantas contida em um metro linear e A_{sl} ($m^2 m^{-2}$) é área de solo ocupada pelas plantas:

$$A_{sl} = \frac{1}{2} C_l (L_s + L_d) \quad 2$$

em que, C_l é o comprimento linear de plantas avaliadas ($C_l = 1$ m, nas avaliações) e L_s e L_d são os comprimentos dos espaçamentos das fileiras duplas. A área foliar foi obtida por $AF = f C L$, em que C (m) e L (m) são, respectivamente, os comprimentos e larguras da folha e f é um fator de forma, igual a 0,75 (Monteiro, 2005; Pincelli, 2012). A medição do comprimento e largura das folhas foi feita diretamente no campo através de uma trena. A área foliar total de uma planta (AP) foi obtida somando-se a área foliar de todas as folhas, sendo AF_t da eq. (1) obtido pela soma das áreas foliares de todas as plantas em 1 metro linear. Substituindo a eq. 02 na eq.01, temos que:

$$IAF = \frac{2AF_t}{C_l (L_s + L_d)} \quad 3$$

Note que, substituindo os valores de L_s , L_d e C_l na eq. (3), resulta em $IAF = AF_t$ (numericamente).

Figura 3. Imagem aérea do sistema agrofotovoltaico, obtido por drone (modelo DJI Air 2S), utilizando câmera RGB, aos 281 DAC (dias após corte).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.3 Altura do dossel (AP) e perfilhamento

As medições da altura do dossel (AP) da cultura foram realizadas sempre em seis pontos em cada ambiente, previamente determinada. Em cada ponto, determinou-se a altura média das plantas contidas em um metro linear, utilizando-se uma trena.

A determinação do perfilhamento foi feita pela contagem do número de plantas contidas por metro linear, dividido pela área ocupada pelas plantas, seguindo a eq. (02).

3.4 Soma térmica acumulada

O crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar também foi comparado em relação aos graus-dia acumulados GD_t . Para tanto, seguiu-se a abordagem a abordagem proposta por Liu et al. (1998):

$$GD_j = GDg_j - GDa_j - Tb \quad 4$$

$$GD_t = \sum_{j=1}^n GDg_j - GDa_j - Tb \quad 5$$

em que GD_{gj} ($^{\circ}C$) e GD_{aj} ($^{\circ}C$) representam, respectivamente, a quantidade dos graus-dia nas condições de temperaturas sub-ótimas e supra ótimas (devido aos efeitos adversos da alta temperatura no desenvolvimento da cultura), definidas por (Liu et al., 1998):

$$GDg_j = \begin{cases} \frac{Tmin_j + Tmax_j}{2}, & Tb \leq Tmin_j \\ \frac{Tmin_j + Tmax_j}{2} + \frac{(Tb - Tmin_j)^2}{2(Tmax_j - Tmin_j)}, & Tmin_j < Tb < Tmax_j \\ Tb, & Tb \geq Tmax_j \end{cases} \quad 6$$

$$GDa_j = \begin{cases} 0, & Tmax_j < To \\ \frac{(Ts - Tb)(Tmax_j - To)^2}{2(Ts - To)(Tmax_j - Tmin_j)}, & To > Tmin_j, Tmax_j < Ts \\ \frac{Tmax_j(Tmax_j - 2Tb) - To(Ts - Tb) + TsTb}{2(Ts - To)}, & To > Tmin_j, Tmax_j \geq Ts \\ \frac{(Ts - Tb)(Tmax_j + Tmin_j - 2To)}{2(Tmax_j - Tmin_j)}, & To \leq Tmin_j < Ts, Tmax_j < Ts \\ \frac{Tmax_j + Tmin_j}{2} - Tb - \frac{(To - Tb)(Ts - Tmin_j)^2}{2(Ts - To)(Tmax_j - Tmin_j)}, & To \leq Tmin_j < Ts, Tmax_j \geq Ts \\ \frac{Tmax_j + Tmin_j}{2} - Tb, & Tmin_j > Ts \end{cases} \quad 7$$

em que, max ($^{\circ}C$) e $Tmin$ ($^{\circ}C$) são, respectivamente, as temperaturas mínima e máxima do ar do dia, Ts é temperatura máxima limite ($40^{\circ}C$), To é a temperatura ótima para o desenvolvimento da cana ($30^{\circ}C$) e Tb ($^{\circ}C$) é a temperatura-base, para cada fase fenológica ($^{\circ}C$). O valor de Tb adotado foi $20^{\circ}C$ (Amaral et al., 2020). Detalhes sobre o cálculo dos termos da eq. (4) a (7) são descritos em Liu et al. (1998). Os valores dos demais parâmetros requeridos foram obtidos do artigo por uma compilação de dados feita pelos autores. As equações foram implementadas em linguagem de programação Python utilizando o ambiente de desenvolvimento Spyder.

3.5 Produtividade e biomassa da parte aérea

A avaliação da produtividade e da biomassa da parte aérea (Fig. 4) foi realizada no dia 11/09/2023, com coletas conduzidas em 12 pontos amostrais por sistema – sendo o sistema REF (área testemunha, sem a influência do sombreamento dos painéis fotovoltaicos) e o sistema SAF (sob os painéis) – totalizando 24 unidades amostrais. Cada ponto correspondia a duas linhas duplas de cana-de-açúcar com 3 metros de comprimento, perfazendo uma área de 12 m^2 por ponto. A seleção dos locais de amostragem foi realizada aleatoriamente em ambas as áreas avaliadas.

Durante a colheita, as plantas foram separadas em três componentes: folhas, palmito e colmos (Fig. 04), permitindo a quantificação individualizada de cada parte da planta. A massa fresca foi obtida por meio de um dinamômetro. Para a estimativa da produtividade de colmos, foi considerada a massa total dos colmos industrializáveis de cada ponto, com os dados convertidos para toneladas por hectare (TCH). Já o restante da parte aérea, foram consideradas apenas as massas de folhas e palmito, representando a fração não industrializável da planta.

Para determinar o teor de umidade nas folhas, palmito e colmo, realizou-se a coleta de uma porção de cada componente. Em seguida, essas amostras foram processadas em uma forrageira, que, após a homogeneização, coletou-se uma fração e para determinar a massa úmida utilizando uma balança de alta precisão (resolução de $\pm 0,01\text{ g}$). Posteriormente, as amostras foram submetidas à secagem em estufa de ventilação forçada a temperatura constante de $65^{\circ}C$ por 72 horas, para a determinação da massa seca de cada componente da planta.

Figura 4. Particionamento das canas na avaliação de produtividade, onde 1, 2 e 3 representam, respectivamente, folhas, palmitos e colmos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.6 Testes de Student

Para determinar e avaliar a significância das médias da produtividade de folhas, palmitos e colmos encontrados em cada sistema, foi utilizado o teste t de Student. A hipótese nula, de que não há diferença significativa entre as médias, é rejeitada quando o valor calculado de T (T_{calc}) é maior que o valor tabelado de T (T_{tab}) para um nível de significância $\alpha = 5\%$ (Oliveira., 2010). As equações foram implementadas no ambiente de desenvolvimento Python.

3.7 Dados de entrada no modelo DSSAT

Utilizou-se o modelo mecanístico DSSAT/CANEGRO, versão 4.5, com o objetivo de simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura da cana-de-açúcar. O módulo CANEGRO, específico para a cultura da cana-de-açúcar, baseia-se na modelagem de processos fisiológicos e fenológicos, exigindo como entrada dados meteorológicos, de solo, genéticos e de manejo.

Os dados meteorológicos diários utilizados pelo modelo DSSAT/CANEGRO foram temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), Irradiação solar global ($\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), Umidade relativa (%), velocidade do vento (m s^{-1}) e precipitação (mm). Estes dados foram obtidos da estação meteorológica do CECA/UFAL, localizada a aproximadamente 300 metros em linha reta da área experimental. No modelo, estes dados foram inseridos em um arquivo do

tipo WTH, seguindo a estrutura recomendada; em seguida, o arquivo foi depositado na pasta Weather do programa.

Os dados das propriedades físicas do solo foram obtidos de Santos et al. (2019): densidade do solo (1,215: 0-10; 1,155: 10-20; 1,12: 20-30; 1,1: 30-40 cm), coloração (amarelo), declinação (> 2%), e porcentagens de areia, argila e silte do Latossolo Amarelo coeso argissólico. Considerando a metodologia proposta no DSSAT/CANEGRO, os dados citados foram inseridos dentro do programa, na ferramenta SBUILD.

Os ajustes dos dados do ecótipo foram realizados por meio de uma abordagem heurística, utilizando inicialmente os valores de parâmetros disponíveis no modelo para a cultura da cana-de-açúcar. A calibração foi conduzida com base no método de tentativa e erro (try and error), em que uma variável era ajustada enquanto as demais permaneciam constantes, permitindo a comparação direta com uma condição de referência. Esse procedimento possibilitou avaliar a sensibilidade do modelo, observando a influência das variações nos parâmetros de entrada sobre as variáveis de saída do modelo. A condição de referência adotada foi a da variedade RB867515, a qual foi selecionada por já ter sido calibrada no módulo de variáveis genéticas e estar pré-cadastrada no programa. A Tabela 1 é composta por sete colunas que organizam informações relacionadas a variáveis do ecótipo na modelagem do crescimento da planta. A primeira coluna apresenta o número de identificação da variável, seguido pelo nome da variável conforme o modelo DSSAT/CANEGRO. As colunas seguintes exibem: o valor de referência utilizado pelo modelo DSSAT/CANEGRO, os valores adotados especificamente para a variedade RB867515, os valores ajustados para a variedade RB92579, a categoria fisiológica à qual a variável está relacionada (como acúmulo ou partição de biomassa), e, por fim, uma descrição resumida da função ou significado da variável no modelo.

Tabela 1 – Parâmetros fenológicos e de crescimento utilizados na simulação da cana-de-açúcar pelo modelo DSSAT/CANEGRO.

ID	NOME	VALOR DE REFERÊNCIA DSSAT	REFERÊNCIA (RB867515)	DADO AJUSTADOS (RB92579)	CATEGORIA	DESCRIÇÃO
1	MaxPARCE	9.9	14.690	14.69	acúmulo de biomassa	Eficiência de conversão de radiação máxima (sem estresse) expressa como assimilado produzido antes da respiração, por unidade PAR. (g/MJ).
2	APFMX	0.88	0.602	0.602	partição de biomassa	Fração máxima de incrementos de massa seca que podem ser alocados para massa seca aérea (t/t).
3	STKPFMAX	0.65	0.590	0.59	partição de biomassa	Fração de incrementos diários de massa aérea seca particionada para colmo em altas temperaturas em uma cultura madura (t/t em base de massa seca).
4	SUCA	0.65	0.580	0.58	acúmulo de sacarose	Fração de incrementos diários de massa aérea seca particionada para colmo em altas temperaturas em uma cultura madura (t/t em base de massa seca).
5	TBFT	25	25.000	25	acúmulo de sacarose	Partição de sacarose: Temperatura na qual a partição de incrementos de massa de caule não estressados para sacarose é 50% do valor máximo (°C).
6	LFMAX	12	10.000	15	dossel - folhas	Número máximo de folhas verdes que uma planta saudável e adequadamente regada terá depois de velha, o suficiente para perder algumas folhas.
7	MXLFAREA	360	594.000	360	dossel - folhas	Área foliar máxima atribuída à todas as folhas acima do número de folhas MXLFARNO (cm ²).
8	MXLFARNO	14	18.000	14	dossel - folhas	Número da folha acima do qual a área da folha é limitada à MXLFAREA
9	PII	69	89.000	89	fenologia da folha	Intervalo de filocrono 1 (para números de folhas

10	PI2	169	107.000	107	fenologia da folha	abaixo de PSWITCH, °Cd (base TTBASELFEX). Intervalo fitocromo 2 (para números de folhas acima de PSWITCH, °Cd (base TTBASELFEX)).
11	PSWITCH	18	18.000	18	fenologia da folha	Número da folha em que o filocrono muda. Tempo térmico para a emergência de uma cultura da planta (°Cd, base TTBASEEM).
12	TTPLNTEM	428	150.000	80	fenologia	Tempo térmico para a emergência de uma soqueira (°Cd, base TTBASEEM).
13	TTRATNEM	203	30.000	15	fenologia	Tempo térmico da emergência ao início do crescimento do caule.
14	CHUPIBASE	1050	1478.950	20	fenologia	Tempo térmico desde a emergência até o pico da população de perfilhos (°Cd, base TTBASEPOP).
15	TT_POPGROWTH	600	1010.000	650	fenologia	População de perfilhos em/após 1600 graus-dia (m ²).
16	POPTT16	13.3	11.500	8	fenologia do perfilho	Tempo térmico para a emergência de uma cultura vegetal.
17	TAR0	0.02 - 0.03	0.045	0.055	fenologia do perfilho	Tempo térmico para a emergência de uma cultura de soca.
18	TDELAY	0 - 70	20.000	20	fenologia do perfilho	máx. taxa de alongamento da folha por °Cd.
19	LER0	0.2 - 0.4	0.250	0.9	dossel - folhas	máx. taxa de alongamento do caule por °Cd.
20	SER0	0.1 - 0.4	0.250	0.003	fenologia	(massa fresca de talos, folhas e água ligada a eles) onde começa o alojamento; t/ha
21	LG_AMBASE	220	220.000	220	tombamento	AINDA NÃO USADO.
22	AQP_UP5	0.5 - 0.7	0.450	0.45	extração de água	Fração disponível de depleção de água no solo na qual o estresse hídrico da fotossíntese começa.

Fonte: Adaptado de Singels et al., 2008.

Os efeitos das variações dos parâmetros foram avaliados com base em três variáveis de saída: índice de área foliar (IAF), altura das plantas e número de perfilhos. Quando necessário, os parâmetros de entrada foram ajustados de forma incremental ou decrementar e os efeitos foram analisados em relação aos valores de saída.

Embora nem todos os parâmetros tenham sido ajustados, é importante ressaltar que tais ajustes devem ser embasados no manual do modelo (Singels et al., 2008), na literatura científica sobre a cana-de-açúcar e nos dados de campo específicos da região em estudo.

3.8 Índices estatísticos

A avaliação do modelo foi realizada com base em três índices estatísticos: o coeficiente de determinação (r^2), que indica a precisão do modelo, o índice de concordância (d), proposto por willmott (1981) para avaliar exatidão das previsões de modelos e a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE), uma medida de exatidão das preções do modelo em termos absolutos.

As variáveis de estado do modelo DSSAT/CANEGRO escolhidas para comparação foram o índice de área foliar, altura das plantas e número de perfilhos. As equações e análise de desempenho do modelo também foram realizadas por meio de um programa escrito em linguagem computacional Python.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Índice de área foliar

O IAF entre os dois sistemas avaliados (SAF e REF), constata-se uma diferença expressiva ao longo de todo o ciclo da cultura, com valores superiores no SAF. O IAF máximo em ambas as áreas ocorreu na mesma data, ou seja, para a mesma quantidade de graus-dias acumulados. No entanto, em magnitude, o IAF máximo da cana-de-açúcar no SAF ($3,48 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) foi 25,6% maior do que no REF ($2,69 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). Ou seja, durante o período avaliado, as alterações do microambiente proporcionadas pelos painéis solares sobre a cultura favoreceram o crescimento foliar da cultura.

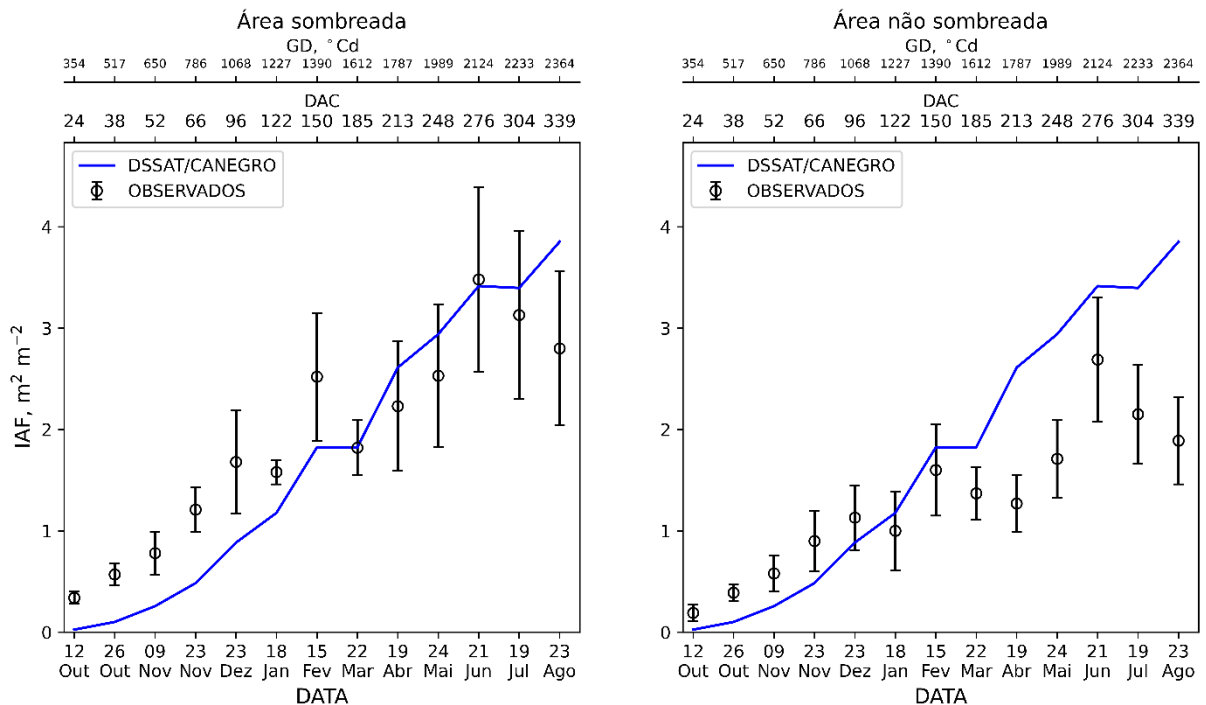
A média dos valores de IAF observados desde o início do ciclo até o ponto de IAF máximo foi de $1,70 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ no SAF e $1,17 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ no REF, reforçando a tendência de maior desenvolvimento vegetativo na área com sombreamento parcial.

As taxas de crescimento diário do IAF também foram superiores no SAF, com aproximadamente $0,010 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ por dia, em comparação aos $0,008 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ registrados no sistema REF.

A estimativa do IAF pelo modelo DSSAT (Fig. 5) apresentou valores próximo aos observados apenas em parte do ciclo. No SAF, o modelo subestimou os valores de IAF até os 185 DAC, enquanto no sistema REF a subestimação ocorreu até os 96 DAC. Após esses períodos, houve superestimação dos valores em ambos os sistemas, principalmente na fase final do ciclo. Além disso, o modelo não capturou adequadamente a redução do IAF observada nas avaliações de campo, possivelmente em razão de estresse hídrico não modelado de forma satisfatória. Outro ponto importante é que os valores simulados para o IAF foram idênticos para ambos os sistemas, o que não reflete a realidade observada. Essa limitação é reconhecida, e análises futuras deverão considerar a redução da irradiação solar global no cenário SAF como forma de representar de maneira mais adequada o sombreamento causado pelos painéis solares.

Apesar dessas limitações, o modelo apresentou taxas de crescimento diário simuladas coerentes com as observadas, sendo da ordem de $0,011 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, em um ciclo de 339 dias, o que demonstra um efeito positivo da calibração inicial realizada com os dados de campo.

Figura 5. Variação temporal (data, dias após o corte *DAC* ou graus-dias acumulados *GD*) do índice de área foliar observado e simulado pelo modelo DSSAT/CANEGRO no sistema SAF e REF.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

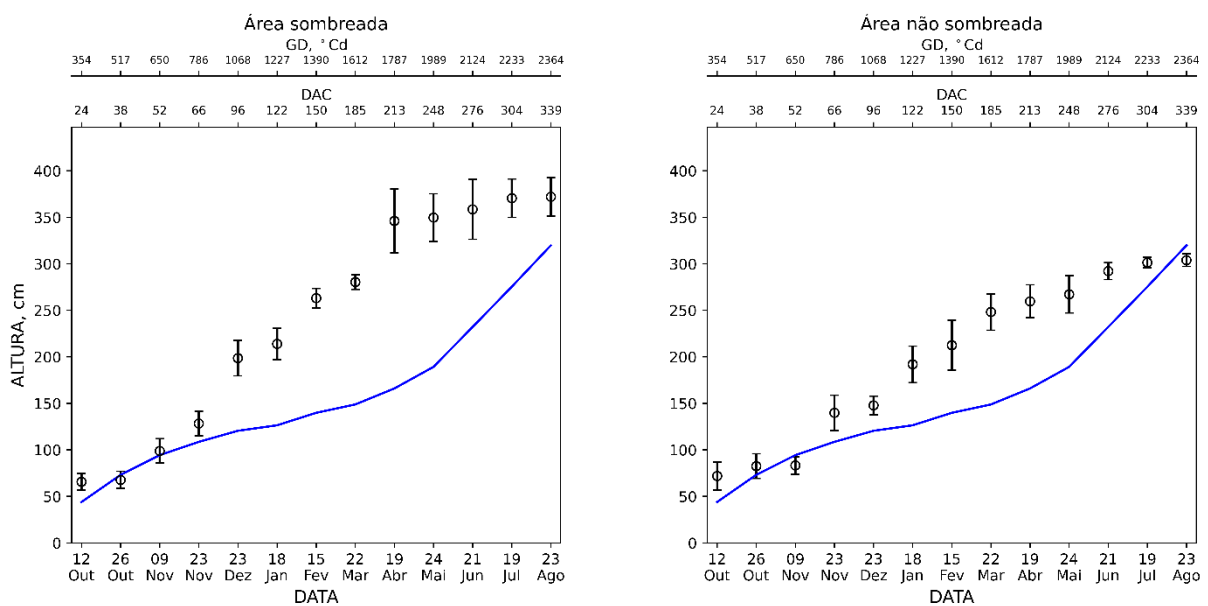
4.2 Altura das plantas

A altura da planta, assim como o IAF, apresentou maiores valores no sistema SAF, que atingiu um máximo de aproximadamente 372,0 cm aos 2364 °C d. Em contrapartida, a cana-de-açúcar cultivada no REF alcançou cerca de 303,9 cm, representando uma diferença expressiva de aproximadamente 68,1 cm em favor do SAF. Esses valores observados para a altura do dossel da cana-de-açúcar estão dentro da faixa de variação reportada na literatura, que varia entre 1 e 5 metros (Miller; Gilbert, 2009).

No período de 0 a 339 DAC (18/09/2022 - 23/08/2023), a taxa de variação média da altura média do SAF apresentou um aumento médio de aproximadamente 1,1 cm por dia. Em contraste, o sistema REF registrou uma taxa ligeiramente inferior de 0,90 cm por dia, resultando em uma diferença de 0,2 cm diários a favor do SAF. Em comparação, o modelo DSSAT/CANEGRO demonstrou um crescimento médio de cerca de 0,94 cm por dia, um valor que se assemelha às taxas observadas em ambos os cenários analisados.

Ao final do ciclo, o modelo atingiu uma altura máxima de 319,7 cm aos 339 DAC, o que corresponde a uma diferença de 52,3 cm em relação à altura máxima do SAF e 15,8 cm em relação ao REF.

Figura 6. Variação temporal (data, dias após o corte DAC ou graus-dias acumulados GD) da altura das plantas observada e simulada pelo modelo DSSAT/CANEGRO no sistema SAF e REF.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os valores estimados de altura da planta pelo modelo DSSAT/CANEGRO divergiu notoriamente dos observados, entre o período de 96 a 276 DAC. Somente no início (DAC \leq 52) do ciclo o modelo simulou valores de altura da planta próximos aos observados, com leve superestima e subestima no início e fim deste período (subestimando em 4,69% no SAF e superestimando em 11,16% no REF aos 52 DAC).

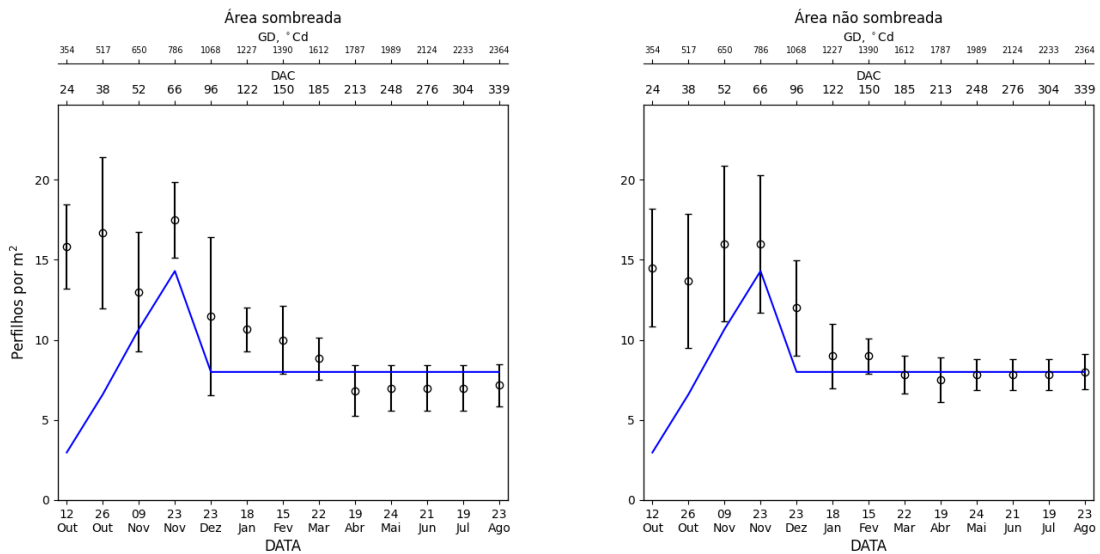
4.3 Perfilhamento

Os maiores valores de número de perfilhos em ambas as áreas ocorreram na fase inicial da cultura, entre 24 (354 °C d) e 66 DAC (786 °C d). A partir dos 96 DAC (1068 °C d), ocorreu uma redução populacional, comum em cana-de-açúcar devido à competição entre os perfilhos (Castro; Christofolletti, 2005). Essa redução tende a se estabilizar na cultura, o que começou a ocorrer aproximadamente aos 185 DAC (1612 °C d) em ambos os cultivos. O menor valor observado do número de perfilho (Fig. 7) contrasta com o valor máximo observado na altura da planta (Fig. 6), ou seja, há uma relação inversa entre a altura da planta e densidade populacional da cultura. A média de perfilhos entre 1787 e 2364 °C d foi de aproximadamente 7 plantas m^{-2} para a área sombreada e 8 plantas m^{-2} para a área não sombreada.

Nas simulações realizadas com o modelo DSSAT/CANEGRO, comparando os dados simulados com os valores observados (Fig. 7), verifica-se que o modelo subestimou o número de perfilhos em ambos os sistemas, especialmente nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura. No SAF, essa subestimação se manteve até os 185 DAC (1612 °C d), enquanto no REF foi observada até os 150 DAC (1390 °C d). A maior discrepância ocorreu aos 24 DAC, ponto no qual a diferença entre os valores simulados e observados foi de aproximadamente 13 perfilhos m^{-2} no SAF e 12 perfilhos m^{-2} no REF.

Além disso, o modelo não foi capaz de representar a redução gradual no número de perfilhos observada após o pico de emissão. Em vez disso, os valores simulados sofreram uma queda abrupta de 14 para 8 perfilhos m^{-2} aos 96 DAC, permanecendo constantes até o final do ciclo.

Figura 7. Variação temporal (data, dias após o corte DAC ou graus-dias acumulados GD) de perfilamento observado e simulado pelo modelo DSSAT/CANEGRO no sistema SAF e REF.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.4 Desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO

A partir dos índices estatísticos apresentados na Tabela 2, nota-se que o modelo DSSAT/CANEGRO apresentou desempenho contrastante ao estimar diferentes variáveis nos dois sistemas de cultivo analisados. Em relação ao IAF, o modelo apresentou maior exatidão no sistema SAF ($RMSE = 0,55 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $d = 0,94$), porém a precisão foi similar em os dois sistemas, indicado pelo r^2 (levemente superior no SAF).

Analisando-se variável altura, nota-se um cenário inverso ao do IAF: o modelo apresentou desempenho superior na REF. Neste caso, a precisão do modelo também foi similar nos dois sistemas avaliados, com $r^2 = 0,81$ na REF e $r^2 = 0,79$ no SAF, porém, em geral, inferior do que na estimativa do IAF. Analisando-se a exatidão, o melhor desempenho ocorreu na REF, onde foi observado o maior valor de d entre as variáveis analisadas nas duas áreas. Além disso, o RMSE (= 56,6 cm) na REF foi praticamente a metade do valor observado no SAF (RMSE = 101,2 cm).

Em relação ao número de perfilhos, ambos os sistemas apresentaram resultados insatisfatórios, com r^2 muito baixos (0,02 no SAF e 0,06 no REF) e índices d modestos (0,51 e 0,55, respectivamente), além de um RMSE maior que 4 para ambos os sistemas, o que significa um erro médio de quatro perfilhos para mais ou para menos no modelo.

Tabela 2. Cálculo de desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO

	IAF			ALTURA			PERFILHOS		
	r ²	RMSE (m ² m ⁻²)	d	r ²	RMSE (cm)	d	r ²	RMSE (-)	d
SAF	0.89	0.55	0.94	0.79	101.23	0.78	0.02	4.90	0.51
REF	0.83	0.88	0.81	0.81	56.57	0.89	0.06	4.23	0.55

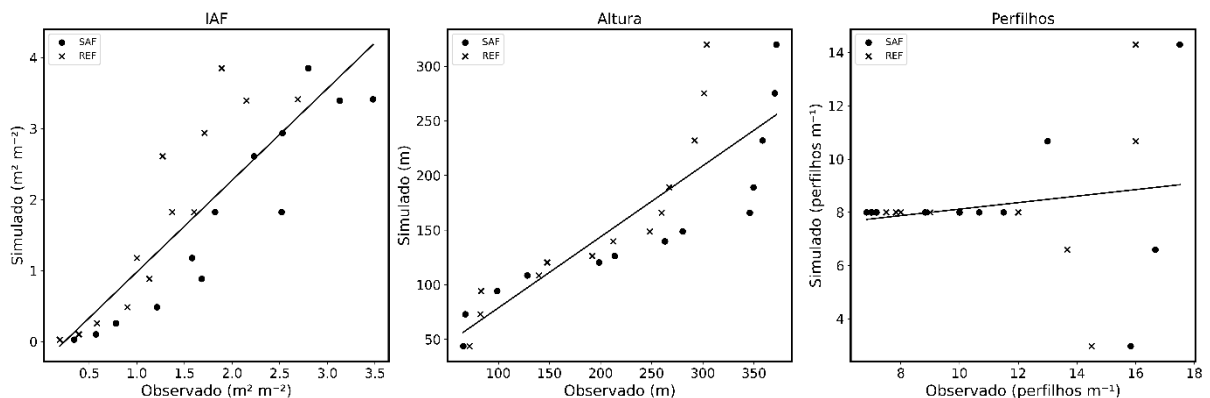
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 8 apresenta a comparação entre os valores simulados e observados para o índice de área foliar (IAF), altura das plantas e número de perfilhos, permitindo avaliar o desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO nos dois sistemas analisados: área sombreada (SAF) e área não sombreada (REF). Os resultados demonstram que o modelo apresentou melhor desempenho na simulação do IAF, especialmente no SAF, com boa proximidade entre os valores simulados e observados, principalmente nas fases iniciais e intermediárias do ciclo. Contudo, verificou-se uma tendência de superestimação nos valores mais altos, especialmente no REF, onde o ajuste foi menos satisfatório.

No que se refere à altura das plantas, o modelo foi mais preciso no sistema REF, enquanto no SAF as simulações superestimaram significativamente os valores observados, indicando que o modelo apresentou limitações na representação da estatura da cultura sob condições de sombreamento.

Em relação ao número de perfilhos, o modelo mostrou baixa sensibilidade às variações observadas ao longo do ciclo. Os valores simulados permaneceram praticamente constantes após a fase inicial, não refletindo o comportamento dinâmico registrado em campo, no qual houve variações associadas ao sombreamento, à competição entre perfilhos e ao avanço do ciclo.

Figura 8. Relação entre os valores observados e estimados pelo modelo DSSAT/CANEGRO para o SAF e REF.

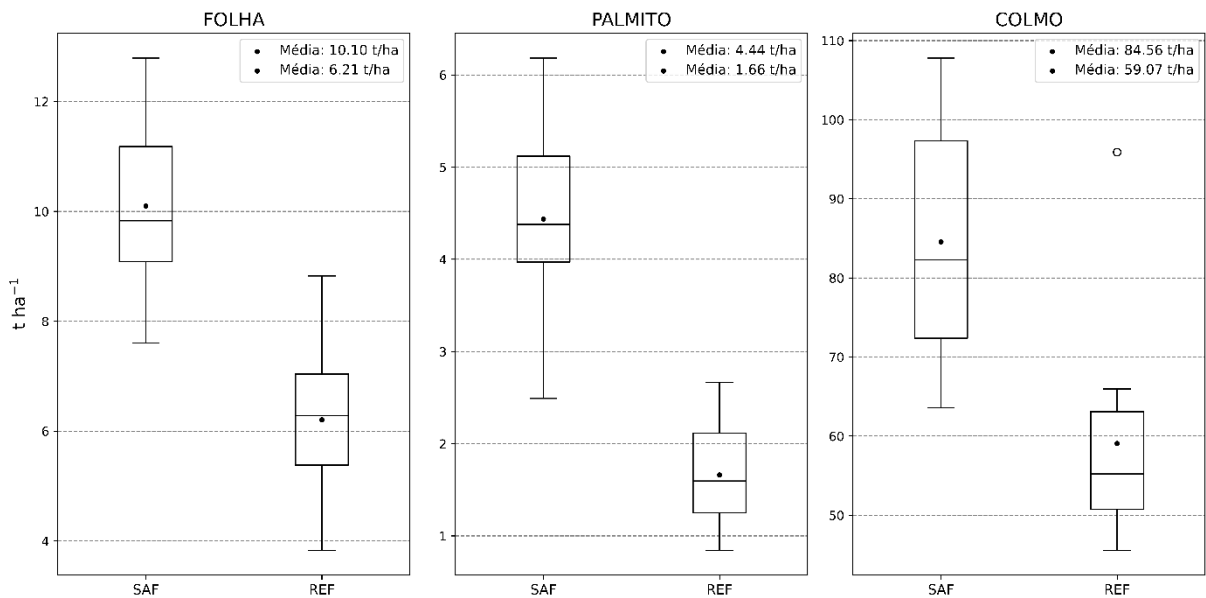


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.5 Produtividade agrícola

Houve diferença significativa ($p < 0,05$) para a produtividade de folhas, palmitos e colmos (TCH), entre as duas áreas analisadas: SAF e REF (Fig. 9). O SAF destacou-se como um ambiente mais favorável para o desenvolvimento da cultura.

Figura 9. Boxplots da produtividade de massa fresca de colmos, palmitos e folhas em área sombreada (SAF) e área não sombreada (REF).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No SAF, a produtividade média das folhas foi aproximadamente $10,10 \text{ t ha}^{-1}$, enquanto que, na REF (testemunha), foi aproximadamente igual a $6,21 \text{ t ha}^{-1}$, uma diferença de 47,7%, equivalente a $3,89 \text{ t ha}^{-1}$. Uma possível explicação para essa diferença está relacionada à disponibilidade de luz. Em ambiente sombreado, as plantas podem otimizar a luz disponível, resultando em uma maior taxa de fotossíntese e, conseqüentemente, mais biomassa nas folhas. Isso é uma adaptação comum em plantações de café sob baixos níveis de radiação, como observado por Matta e Rodríguez (2007). Os autores destacaram o aumento da área foliar específica em ambientes sombreados. Portanto, a maior produtividade das folhas na SAF pode ser atribuída a essas adaptações às condições de sombra.

Os resultados de produtividade para o palmito mostram uma diferença ainda mais expressiva entre o SAF e a REF. A produtividade média de palmito no SAF foi de

aproximadamente $4,44 \text{ t ha}^{-1}$, enquanto na testemunha foi de cerca de $1,66 \text{ t ha}^{-1}$. Uma diferença de 91,15%, algo próximo de $2,78 \text{ t ha}^{-1}$.

Os resultados indicam que a produtividade de colmos no SAF foi significativamente ($p < 0,05$) superior à produtividade na REF (Fig. 8). Isso sugere que as condições proporcionadas pelos painéis tiveram um impacto positivo no crescimento e desenvolvimento dos colmos. A média de produtividade na SAF foi aproximadamente $84,56 \text{ t ha}^{-1}$, o que supera consideravelmente a média na REF, de aproximadamente $59,07 \text{ t ha}^{-1}$; ou seja, houve uma diferença em torno de 30,14%, em que o SAF apresentou cerca de $25,49 \text{ t ha}^{-1}$ a mais que a REF.

Assim como na produtividade de folhas, esta diferença também pode estar atrelada à disponibilidade de luz. Ambiente sombreado, conforme discutido na literatura (Muschler, 1999; Beer et al., 1998; Farrell, 2002.), proporciona um microclima com menores valores de radiação solar direta sobre a cultura. Assim, este ambiente sombreado resulta em uma menor perda de água por evapotranspiração, que pode reduzir o efeito de estresse hídrico do solo.

Em resumo, os resultados do teste de student para produtividade agrícola indicaram que a sombra dos painéis solares teve um impacto positivo na produtividade de todas as variáveis morfológicas analisadas. Colmos, palmito e folhas demonstraram um desempenho superior na SAF em comparação com a testemunha, sugerindo que a gestão adequada da luminosidade neste sistema pode ser um fator que otimize a produção de cana-de-açúcar.

5 CONCLUSÕES

O cultivo de cana-de-açúcar em sistema agrofotovoltaico (SAF), nas condições meteorológicas avaliadas em um ano de cultivo em regime de sequeiro, apresenta diferenças significativas em relação ao cultivo sem os efeitos dos painéis solares (REF), com destaque para o maior índice de área foliar, maior altura das plantas e maior produtividade agrícola (TCH), sem impactos negativos sobre o número de perfilhos.

O desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO nas condições avaliadas varia de acordo com o sistema e variáveis analisadas. No SAF, as predições do índice de área foliar do modelo indicam alta precisão e exatidão pelos índices, no entanto, apresenta baixa desempenho para simulação da altura da planta. No sistema REF, o desempenho é satisfatório para altura (RMSE = 56,57), mas a estimativa do índice de área foliar apresenta maior erro (RMSE = 0,88). Para o número de perfilhos, o modelo apresenta baixo desempenho em ambos os sistemas, com RMSE superior a 4 unidades.

Esses resultados indicam a necessidade de ajustes nos parâmetros fornecidos ao modelo e de uma calibração mais abrangente dos valores dos ecótipos da variedade RB92579, com base em dados observacionais. Esse refinamento é fundamental para aprimorar o desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO em simular o crescimento da cana-de-açúcar em diferentes condições de cultivo, especialmente em ambientes com sombreamento, como os encontrados em sistemas agrofotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

- AMADUCCI, S.; YIN, X.; COLAUZZI, M. **Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production.** *Applied Energy*, v. 220, p. 545–561, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>. Acesso em: 31 mar. 2025.
- AMARAL, M. A. C. M.; COELHO, R. D.; JOSÉ, J. V.; OLIVEIRA, Á. S. de. **Temperatura base e taxa de crescimento de oito variedades de cana-de-açúcar.** *Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia*, v. 5, n. 1, 2020.
- AYYAR, V. R.; SIVARAMAKRISHNAN, V. R.; VASUDEVAN, A. K. **Studies on the growth analysis of sugarcane.** *Indian Journal of Agricultural Sciences*, v. 35, p. 53-63, 1965.
- BARROS, Allan Cunha. **Modelagem de culturas agrícolas: um enfoque conceitual e operacional.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 2, p. 241-249, 2011.
- BEER, J.; MUSCHLER, R.; KASS, D.; SOMARRIBA, E. **Shade management in coffee and cacao plantations.** *Agroforestry Systems*, v. 38, p. 139-164, 1998.
- BEZUIDENHOUT, C. N.; SINGELS, A.; VAN DER MERWE, R. **Growth and yield simulations for sugarcane modelling.** *Field Crops Research*, v. 83, p. 307-322, 2003.
- CASTRO, P. R. C.; CHRISTOFOLETTI, P. J. **Fisiologia da Produção de Cana-de-açúcar. Piracicaba:** ESALQ/USP, 2005.
- CHEN, X.; YANG, X.; LUO, W.; LIU, W.; WU, Z.; LIU, H. **Photovoltaic Agriculture: Application and Development in China.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 110, p. 376-389, 2020.
- COELHO, A. P.; DALRI, A. B.; FISCHER FILHO, J. A.; FARIA, R. T.; SILVA, L. S.; GOMES, R. P. **Calibration and evaluation of the DSSAT/Canegro model for sugarcane cultivars under irrigation managements.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 1, p. 52–58, 2020.
- DE CARVALHO, André Luiz et al. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar com o modelo DSSAT/CANEGRO em São Paulo.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, p. 123-135, 2018.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield Response to Water.** FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: FAO, 1979.
- FARRELL, T. C. **Effect of light environment on the physiology of coffee (Coffea arabica L.).** *Field Crops Research*, v. 27, p. 3-20, 2002.
- GODOY, S. R. **Modelos de simulação de culturas agrícolas.** *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 15, p. 95-108, 2007.

- GONG, X.; MA, X.; LIU, J.; SHI, W.; CHEN, L. **Agrophotovoltaic systems: a comprehensive review of benefits, challenges, and future perspectives**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 140, p. 110728, 2021.
- HUANG, Y.; DENG, X.; WANG, C.; JIANG, H. **The application of agrivoltaic systems in China**. *Renewable Energy*, v. 133, p. 1216-1221, 2019.
- INMAN-BAMBER, N. G. **Climate-smart sugarcane: DSSAT/CANEGRO model update**. *Sugar Tech*, v. 17, p. 197-210, 1995.
- JAME, Y. W.; CUTFORTH, H. W. **Crop Growth Models for Decision Support Systems**. *Canadian Journal of Plant Science*, v. 76, p. 9-19, 1996.
- JAMES, G. **Sugarcane**. 2. ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2004.
- JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D. **The DSSAT cropping system model**. *European Journal of Agronomy*, v. 18, p. 235-265, 2003.
- LEGATES, D. R.; MCCABE Jr., G. J. **Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation**. *Water Resources Research*, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.
- LIU, W.; BULL, T. **Simulating biomass accumulation and sugar partitioning in sugarcane**. *Field Crops Research*, v. 70, p. 129-140, 2001.
- LIU, X.; CHENG, X.; LIU, L.; ZHANG, W. **Photovoltaic Agriculture: A new development mode of rural economy**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 93, p. 493-500, 2018.
- MANITA, D. **Agrivoltaic systems: synergy between agricultural production and solar energy**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 135, p. 110169, 2022.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.; DONNELLY, A.; RICHARDSON, C. W. **Sugarcane simulation in DSSAT: a review**. *Field Crops Research*, v. 90, p. 189-202, 2009.
- MELLO, F. H. M.; CAIMI, A. **Modelagem de crescimento de culturas agrícolas**. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 16, p. 123-132, 2008.
- MILLER, J. D.; GILBERT, R. A. **Sugarcane physiology: principles and potential**. *Sugar Tech*, v. 11, p. 99-112, 2009.
- MONTEIRO, J. E. B. A. **Área foliar e crescimento da cana-de-açúcar**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, p. 1-10, 2005.
- MONTEITH, J. L. **Climate and the efficiency of crop production in Britain**. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 281, p. 277-294, 1996.

MOTTA, A. F.; SILVA, J. R.; RIBEIRO, F. B.; LIMA, R. P. **Potenciais benefícios do sistema agrofotovoltaico na cultura da cana-de-açúcar.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 26, p. 45-52, 2022.

MUSCHLER, R. G. **Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica.** Agroforestry Systems, v. 44, p. 215-224, 1999.

NASSIF, D. S. P.; COELHO, S. T.; ALVES, J. L. **Modelagem do crescimento da cana-de-açúcar em São Paulo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, p. 35-43, 2012.

O'LEARY, G. J. **Simulation modeling: an effective research tool for agriculture.** Agricultural Systems, v. 65, p. 153-166, 2000.

PINCELLI, R. P. **Avaliação da produção de biomassa na cultura da cana-de-açúcar.** Revista Ciência Rural, v. 42, p. 1421-1427, 2012.

SEGATO, S. V.; LIMA, E.; SILVA, M. A. **Análise do crescimento da cana-de-açúcar em diferentes regiões do Brasil.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, p. 1235-1243, 2006.

SILVA, M. A. **Análise do impacto das mudanças climáticas na produtividade da cana-de-açúcar na Bahia.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 27, p. 241-251, 2012.

SILVA, Rômula Fernandes da. **Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO para a cana-de-açúcar e seu uso para a avaliação do impacto das mudanças climáticas.** 2012. 92 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. Disponível em:
<https://bibliotecasemiarios.ufv.br/bitstream/123456789/2696/1/texto%20completo.pdf>.
 Acesso em: 03 abr. 2025.

SINGELS, A.; JONES, M. R.; PORTER, C. H.; SMIT, M. A.; KINGSTON, G.; MARIN, F.; CHINORUMBA, S.; JINTRAWET, A.; SUGUITANI, C.; VAN DEN BERG, M.; SAVILLE, G. **The DSSAT v4.5 CANEGRO model: a useful decision support tool for research and management of sugarcane production.** Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists, v. 27, p. 1–10, 2010.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C. N. **A new approach to modeling biomass accumulation and partitioning in sugarcane.** Field Crops Research, v. 78, p. 81-94, 2002.

SINGELS, A.; JONES, M. R.; VAN DEN BERG, M.; SASSENBERG, H. R. **The DSSAT v4.5 CANEGRO model: a useful decision support tool for research and management of sugarcane production.** 2010.

SOLER, C. M. T. **Modelos de crescimento de culturas agrícolas.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 12, p. 123-140, 2004.

THORNLEY, J. H. M.; JOHNSON, I. R. **Plant and crop modeling.** Caldwell: The Blackburn Press, 2000.