

Simulação do crescimento e da produtividade da cana-de-açúcar em Teresina, PI



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

DOCUMENTOS 204

Embrapa Solos
ISSN 1517-2627

255

Embrapa Meio-Norte
ISSN 0104-866X

**Simulação do crescimento e da produtividade
da cana-de-açúcar em Teresina, PI**

*Alexandre Hugo Cezar Barros
Aderson Soares de Andrade Júnior
Edson Alves Bastos
Ademar Barros da Silva*

Editores Técnicos

Embrapa Solos
Rio de Janeiro, RJ
2018

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024
Jardim Botânico, CEP: 22460-000, Rio de Janeiro, RJ
Fone: + 55 (21) 2179-4500
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Embrapa Meio-Norte

Av. Duque de Caxias, 5.650,
Bairro Buenos Aires
Caixa Postal 01
CEP 64008-780, Teresina, PI
Fone: (86) 3198-0500
Fax: (86) 3198-0530
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da Embrapa Solos
Presidente

Vinicius de Melo Benites

Secretária-Executiva

Jacqueline Silva Rezende Mattos

Membros

*Ademar Barros da Silva, Adriana Vieira de
Camargo Moraes, Bernadete da Conceição
C. G. Pedreira, Enyomara Lourenço Silva,
Evaldo de Paiva Lima, Joyce Maria G. Monteiro,
Luciana Sampaio de Araujo, Marcos Antônio
Nakayama, Maria Regina Capdeville Laforet,
Maurício Rizzato Coelho, Moema de Almeida
Batista, Ricardo de Oliveira Dart, Wenceslau
Geraldes Teixeira*

Supervisão editorial

Jacqueline Silva Rezende Mattos

Revisão de texto

Marcos Antônio Nakayama

Normalização bibliográfica

Enyomara Lourenço Silva

Projeto gráfico da coleção

Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica

Moema de Almeida Batista

Foto da capa

Zineb Benchechou (BME)

1ª edição

1ª impressão (2018): on-line

Todos os direitos reservados.

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Solos

Simulação do crescimento e da produtividade da cana-de-açúcar em Teresina, PI /
Alexandre Hugo Cezar Barros... [et al.]. – Dados eletrônicos. – Rio de Janeiro :
Embrapa Solos, 2018.

32 p.: il. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627; 204); (Documentos
/ Embrapa Meio-Norte, 255).

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: <<https://www.embrapa.br/solos/publicacoes>>.

Título da página da Web (acesso em 04 jan. 2019).

1. Cana-de-açúcar. 2. Estresse ambiental. 3. Produtividade agrícola. I. Barros,
Alexandre Hugo Cezar. II. Andrade Júnior, Aderson Soares de. III. Bastos, Edson
Alves. IV. Silva, Ademar de Barros da. V. Embrapa Solos. VI. Série.

CDD 633.61

Autores

Alexandre Hugo Cezar Barros

Engenheiro-agrônomo, doutor em Física do Ambiente Agrícola, pesquisador da Embrapa Solos, Recife, PE.

Aderson Soares de Andrade Júnior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

Edson Alves Bastos

Engenheiro-agrônomo, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

Ademar Barros da Silva

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Recife, PE.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos estudantes de graduação, pós-graduação e técnicos de campo envolvidos neste trabalho e à Usina COMVAP por fornecer subsídios, sem os quais não seria possível este estudo.

Apresentação

A cultura da cana-de-açúcar no Nordeste tem buscado novas tecnologias para o aumento de produtividade e atendimento da demanda dos mercados interno e externo por etanol. De fato, o cultivo da cana-de-açúcar passa por grandes mudanças na área do planejamento, com novas tecnologias e testes de variedades adaptadas aos mais diversos ambientes de produção, a selecionar características superiores de acordo com os estresses ambientais.

Contudo, devido à complexidade do grande número de variáveis e de processos envolvidos no sistema solo-água-planta-atmosfera, é quase impossível analisar diversas interações naturais do ambiente e das características genéticas de variedades sem a utilização de modelos de apoio à decisão.

No caso da cana-de-açúcar, características bioenergéticas em resposta ao clima, ao solo, ao manejo e aos fatores genotípicos da cultura são informações integradas, que os modelos de apoio à decisão podem auxiliar na análise e no planejamento agrícola.

Este estudo teve como objetivo simular a produtividade da cana-de-açúcar, por meio do modelo DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer ou, em português, Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologias), sob diferentes regimes de irrigação, no Estado do Piauí. Este trabalho insere-se como uma importante ferramenta para análise do crescimento e do desenvolvimento da cultura, usada com a finalidade de identificar e subsidiar estratégias de manejo e conservação do solo e da água em áreas produtoras.

José Carlos Polidoro

Chefe-Geral interino da Embrapa Solos

Sumário

Introdução	11
Material e Métodos	13
Região de estudo	13
Ensaio experimental	14
Dados edafoclimáticos	16
Fertirrigação	18
Manejo da cultura	18
Modelagem do desenvolvimento e da produtividade da cana-de-açúcar ...	19
Resultados	21
Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar irrigada – Teresina, PI	21
Conclusões	30
Referências	30

Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma área total cultivada, em 2017, de aproximadamente 8,84 milhões de hectares e uma produção anual de 647 milhões de toneladas, gerando reflexos importantes na economia brasileira (Conab, 2017).

O Programa Nacional de Agroenergia estima um crescimento superior a 50% na produção da cana-de-açúcar, em resposta à demanda nacional e mundial por álcool combustível e açúcar (Mapa, 2016) e, além disso, aponta para a necessidade de aumento da área plantada com a cultura no Brasil, notadamente, na região Nordeste.

A cultura da cana-de-açúcar no Nordeste, devido à crescente necessidade do setor energético, está demandando tecnologias para o aumento de sua produtividade. O Nordeste contribui com o equivalente a 25% do total de 16 bilhões de litros de álcool/ano do País. Estima-se que exista uma necessidade de aumento de 40% na produção mundial de álcool.

Para atender à demanda dos mercados internos e externos por etanol, estima-se que, em um período de 10 anos, o cultivo da cana-de-açúcar deverá ter um acréscimo de 2 milhões de hectares, implicando a busca de novas áreas de expansão. Tal expansão exige o planejamento da ocupação pela cultura de forma adequada, otimizando a produtividade sem comprometer as questões socioambientais (Andrade Júnior et al., 2012).

Os estados do Nordeste são considerados áreas promissoras de expansão, tanto pelas suas características de solo e clima como, também, pelas condições de logística de exportação de álcool (existência de portos e ferrovia), que facilitam o rápido escoamento do produto, chegando ao consumidor com a qualidade exigida pelo mercado internacional. Entretanto, é importante considerar que as áreas potenciais ao cultivo da cana-de-açúcar, com características físicas, relevo e topografia do solo favoráveis, situam-se em regiões com regimes climáticos semiárido e subúmido seco, com distribuição espacial da precipitação pluviométrica irregular, insuficiente e que não satisfaz a exigência hídrica da cultura de forma adequada durante todo o seu ciclo.

De fato, no Nordeste, o cultivo da cana-de-açúcar passa por grandes mudanças na área do planejamento, com inúmeros testes de variedades aos mais diversos ambientes de produção, visando selecionar características de acordo com estresses ambientais. Contudo, devido à complexidade do grande número de variáveis e de processos envolvidos no sistema solo-água-plantas-atmosfera, é meramente impossível analisar diversas interações naturais do ambiente e das características genéticas de variedades sem a utilização de modelos de apoio a decisão.

Segundo Dourado Neto et al. (1998), os modelos representam um esforço para modernizar a informação, constituindo uma eficiente ferramenta para aprender mais sobre sistemas complexos. Além disso, auxiliam na estimativa da produtividade agrícola de forma sustentável, de acordo com diferentes manejos e ambientes de produção, projetando estimativas de consumo de água e insumos agrícolas.

Os modelos são muito importantes, porque permitem maior controle na análise e comparação entre a produtividade agrícola e o ambiente, principalmente com relação ao uso eficiente da água, utilizando simulações de manejos de irrigação e drenagem de forma controlada e planejada, o que permite analisar diversas variedades e seu potencial genético.

No caso da cultura da cana-de-açúcar, características bioenergéticas como produção de álcool e açúcar, derivados do bagaço, características agrônômicas do peso seco e fresco de colmos, crescimento, uso da água, acúmulo de nitrogênio e matéria seca, em resposta ao clima, ao solo, ao manejo e aos fatores genotípicos da cultura, são informações integradas as quais os modelos de apoio à decisão podem auxiliar na análise e no planejamento agrícola para diferentes ambientes de produção. Para tanto, utilizam-se apenas campos experimentais otimizados, sob diferentes regimes hídricos, diminuindo risco e custos de produção.

No Nordeste, a avaliação do cultivo de cana-de-açúcar sob regime de restrição hídrica é importante, devido ao intenso estresse hídrico que pode ocorrer ao longo do ciclo da cultura. Além do mais, os ambientes que diferem com relação ao clima e a capacidade de armazenamento de água dos diferentes solos podem indicar a forma de manejo mais adequado para a cultura da cana-de-açúcar.

Hartl (1939) estudou regimes controlados de irrigação na cultura de cana-de-açúcar, utilizando a evapotranspiração como princípio fundamental no manejo. Os resultados mostraram que a cana-de-açúcar sob regime controlado de irrigação foi capaz de render dez vezes mais sacarose, em relação às plantas sob estresse hídrico.

Segundo Jones et al. (2003), um sistema de suporte às decisões tem a função de simular o crescimento e o desenvolvimento da cultura, armazenando os resultados em seu banco de dados, a partir de informações sobre o solo, o clima, o manejo e os aspectos genéticos da cultura estudada. A análise conjunta dessas variáveis, por meio de um sistema de apoio a decisão permite planejar melhor o rendimento da cultura.

No Nordeste, a irrigação complementar no cultivo da cana-de-açúcar vem sendo utilizada para possibilitar o aumento da produtividade e verticalização da produção, principalmente nos ambientes de produção que apresentam maior deficiência hídrica.

Este trabalho trata da simulação do crescimento e do desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, em diferentes regimes de irrigação, no Estado do Piauí, por meio do Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologias (Decision Support System for Agrotechnology Transfer – DSSAT), módulo para análise da cultura da cana-de-açúcar (CANEGRO). A partir da simulação, avaliou-se na colheita a produtividade de colmos, acúmulo de açúcares totais e IAF.

Material e Métodos

Região de estudo

Os ensaios experimentais para obtenção dos dados de campo para subsidiar as simulações de crescimento e produtividade de colmos para cultura da cana-de-açúcar foram conduzidos na Embrapa Meio-Norte, em Teresina, PI (5°05S, 42°29W e 72 m de altitude) (Figura 1). A utilização desse local foi devido à existência de atividade econômica de plantios de cana-de-açúcar em uma região representativa das áreas de expansão da cana-de-açúcar no Nordeste.

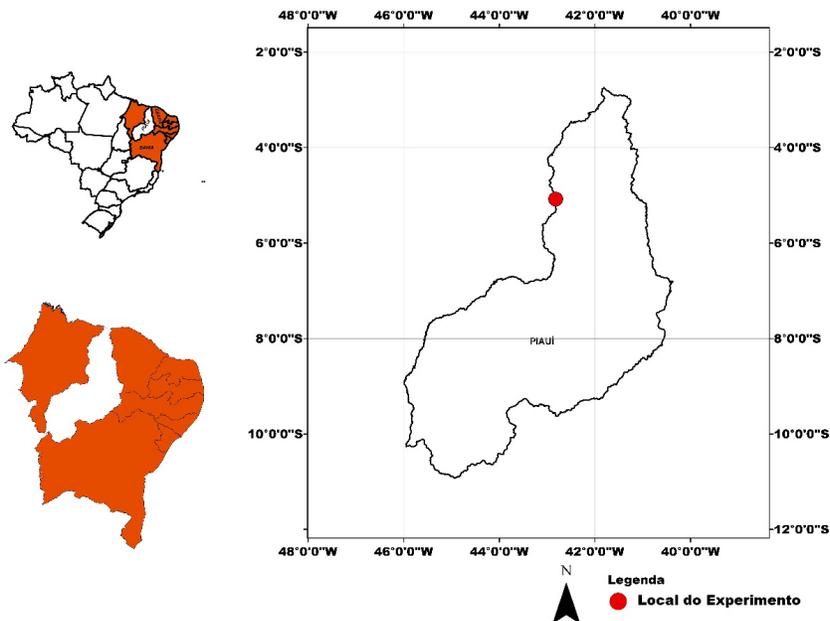


Figura 1. Localização dos experimentos com a cultura da cana-de-açúcar. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

Ensaio Experimental

A cultivar de cana-de-açúcar utilizada foi a RB 867515 por se tratar de uma das variedades comerciais mais plantadas no Brasil e apresentar excelente rendimento, sob as mais diversas condições ambientais e devido ao desempenho produtivo dessa variedade em solos diversos, notadamente os arenosos, e a tolerância a períodos de estiagem agrícola (Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucoalcooleiro, 2017).

O plantio do cultivar foi realizado no período de 20 a 25 de junho de 2011, e a colheita ocorreu no período de 23 de junho a 8 de julho de 2012. Os ensaios foram irrigados com base na demanda hídrica da cultura. Para tanto, foram aplicadas diferentes lâminas de irrigação, baseadas na evapotranspiração de referência (ET_o) local de 50% e 100% da ET_o. Os níveis de irrigação foram aplicados desde o dia 3/10/2011 (102 dias após o plantio - DAP) até o dia 30/12/2011, aos 190 DAP (Tabela 1).

Tabela 1. Lâminas de água aplicadas e fase do ensaio experimental, Teresina, PI, ano safra 2011/2012.

Fase	Lâmina (mm)	
	50% ETo	100% ETo
Antes do estresse	118,1	118,1
Durante o estresse	134,2	268,4
Após o estresse	163,8	163,8
Precipitação	1.205,6	1.205,6
Total aplicado (P+I)	1.621,7	1.755,9

A irrigação foi completamente suspensa aos 30 dias antes da colheita. A evapotranspiração de referência (ETo) foi calculada pelo método de Penman-Monteith, conforme a metodologia proposta por Allen et al. (1998), usando dados climáticos médios diários, obtidos por meio de uma estação agrometeorológica automática, instalada próximo a área experimental (500 m).

Foram plantadas duas fileiras de cana-de-açúcar (Figura 2), com 10 m de comprimento cada, em um espaçamento de fileiras duplas de 0,50 m entre fileiras e 2,0 m entre as fileiras duplas, em uma densidade de 15 gemas por metro linear. A parcela foi constituída por uma fileira dupla de 10 m de comprimento. A área útil da parcela compreendeu os mesmos 10 m de comprimento central da parcela.

O sistema de irrigação foi o de gotejamento subterrâneo, com linhas gotejadoras em polietileno (16 mm de diâmetro), espaçadas de 2 m entre si e enterradas a 0,25 m de profundidade. Os gotejadores são internos e integrados à própria parede da linha gotejadora, com vazão nominal de 2 L/h.

Em todos os ensaios, a umidade do solo foi medida com base na técnica da capacitância, utilizando uma sonda de Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR - Diviner®), a qual foi inserida, no momento da leitura, em tubos de acesso instalados aleatoriamente na área. As profundidades de medição foram: 0,10 m, 0,20 m, 0,30 m, 0,40 m, 0,50 m e 0,60 m. As leituras da umidade foram efetuadas com frequência semanal. Durante o período experimental, foram selecionadas, nas parcelas, plantas para medidas biométricas para avaliação do índice de área foliar.

Foto: Aderson Soares de Andrade Júnior.



Figura 2. Área experimental de cultivo da cana-de-açúcar, variedade RB-867515. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

Dados edafoclimáticos

Para realizar as simulações, o modelo DSSAT-CANEGRO exige a utilização de dados climatológicos diários de temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), precipitação pluviométrica (mm), dados físicos do solo e fisiológicos da cultura.

Os dados climáticos utilizados foram provenientes da estação meteorológica localizada na Embrapa Meio-Norte, em Teresina, Piauí (Tabela 2), instalada a 500 m da área experimental.

Tabela 2. Média dos dados climatológicos da estação meteorológica da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI – Ano safra 2011-2012.

Mês	Tmáx	Tmín	Tméd	UR	Vv	Ins	Eto	P
	°C			%	m/s	h	mm	
Junho/2011	32,9	22,1	27,5	73,7	1,3	7,3	29,4	0,0
Julho	33,1	20,8	26,9	66,9	1,4	9,5	126,3	19,0
Agosto	34,9	20,9	27,9	62,3	1,4	10,1	150,7	10,8
Setembro	36,9	21,4	29,2	54,4	1,7	10,3	176,6	0,6
Outubro	36,0	22,9	29,4	63,6	1,2	8,9	161,7	167,6
Novembro	33,8	22,6	28,2	72,3	1,0	7,8	135,2	124,6

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Dezembro	35,3	23,0	29,1	66,4	0,9	8,6	147,9	23,4
Janeiro	33,4	22,6	28,0	74,8	1,4	6,4	142,0	133,1
Fevereiro	32,3	21,9	27,1	81,4	1,2	5,6	122,5	317,1
Março	32,5	22,4	27,4	83,1	1,2	7,4	127,3	254,0
Abril	33,0	22,6	27,8	80,1	1,0	7,7	118,8	121,0
Mai	33,5	22,4	28,0	74,0	1,0	9,3	120,2	31,3
Junho/2012	34,4	22,0	22,0	69,3	1,0	9,2	70,5	2,8
Ciclo	34,0	22,1	27,6	71,0	1,2	8,3	1.629,1	1.205,3

Tmáx - temperatura máxima; Tmín - temperatura mínima; Tméd - temperatura média; UR - umidade relativa; Vv - velocidade do vento; Ins - insolação; Eto - Evapotranspiração de referência; P - precipitação pluviométrica.

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (Melo et al., 2014). As características físicas e químicas podem ser observadas na Tabela 3. Esse solo apresenta baixa fertilidade e textura arenosa (baixa retenção de umidade), com valores superiores a 60% de areia nas três profundidades (m): 0 a 0,20; 0,20 a 0,40 e 0,40 a 0,60.

Tabela 3. Características físicas e químicas do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico localizado na Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

Prof. (cm)*	Areia grossa	Areia fina	Total de Areia	Silte	Argila	MO ⁽¹⁾	pH ⁽²⁾	P ⁽³⁾
	Granulometria (%)					g/kg	H ₂ O	mg/dm ³
00-20	28,2	44,2	72,4	14,0	13,6	17,7	5,2	5,9
20-40	21,0	46,5	67,4	13,6	18,9	7,1	4,8	2,6
40-60	23,8	36,2	60,0	16,8	23,3	5,8	4,7	2,5

Prof. (cm)*	K ⁽⁴⁾	Ca ⁽⁵⁾	Mg ⁽⁶⁾	CTC ⁽⁷⁾	CC ⁽⁸⁾	PMP ⁽⁹⁾	D _s ⁽¹⁰⁾
	cmol _c /dm ³			cm ³ /cm ³		g/cm ³	
00-20	0,2	1,6	0,7	6,5	0,245	0,055	1,434
20-40	0,2	0,9	0,7	6,8	0,245	0,081	1,603
40-60	0,2	0,8	0,8	7,0	0,268	0,125	1,577

(1) Matéria orgânica (MO); (2) pH₂O (pH); (3) Fósforo (P); (4) Potássio (K); (5) Cálcio (Ca); (6) Magnésio (Mg); (7) Capacidade de troca de cátions (CTC); (8) Capacidade de campo (CC); (9) Ponto de murcha permanente (PMP); (10) Densidade do solo (Ds). *Média de três repetições.

Fertirrigação

A irrigação e a fertirrigação são técnicas benéficas para a cultura da cana-de-açúcar, pois proporcionam melhor desenvolvimento das plantas, maior produtividade e melhor qualidade do produto. A fertirrigação por meio do gotejamento subsuperficial, em termos comparativos, tem se destacado, por apresentar inúmeras vantagens, como: redução da evaporação da água, redução de danos mecânicos ao sistema, menor interferência com os tratos culturais, melhor eficiência na aplicação dos fertilizantes dissolvidos na própria água de irrigação ou fertirrigação e aumento da longevidade do canavial (Andrade Júnior et al., 2012).

A Tabela 4 e a Figura 3 apresentam as doses de fertilizantes de uréia (N) e cloreto de potássio (KCl). Todas as aplicações de fertilizantes foram por meio de fertirrigação nos experimentos, conforme as doses e o parcelamento recomendado por Andrade Júnior et al. (2012).

Foram aplicados, de 15 em 15 dias, macro e micronutrientes nos dois tratamentos, com 50% e 100% da ETo da seguinte forma: 37 g de ácido bórico (H_3BO_3); 60 g de óxido de zinco (ZnO); 52,80 g de óxido de cobre (CuO); 96,30 g de dióxido de manganês (MnO_2); e 8,80 g de molibdato de sódio (NaMo) (Tabela 4).

Chama a atenção o fato de que são raros os trabalhos de simulação do crescimento e do desenvolvimento da cana-de-açúcar utilizando a fertirrigação, o que torna difícil sua comparação com trabalhos nas condições ambientais do Nordeste do Brasil.

Tabela 4. Quantidade de doses de fertilizantes aplicadas em cada tratamento, durante o acompanhamento dos tratamentos 50% ETo e 100% ETo.

Fase	Quantidade de fertilizantes (kg)			
	Ureia	KCl ⁽¹⁾	K ₂ O ⁽²⁾	MAP ⁽³⁾
Antes do estresse	4,0	1,7	27,2	5,0
Durante o estresse	9,2	8,0	122,4	10,0
Após o estresse	2,8	4,7	92,8	5,0
Total aplicado	16,0	14,4	242,4	20,0

(¹) Cloreto de potássio; (²) Óxido de potássio; (³) Fosfato-mono-amônio.

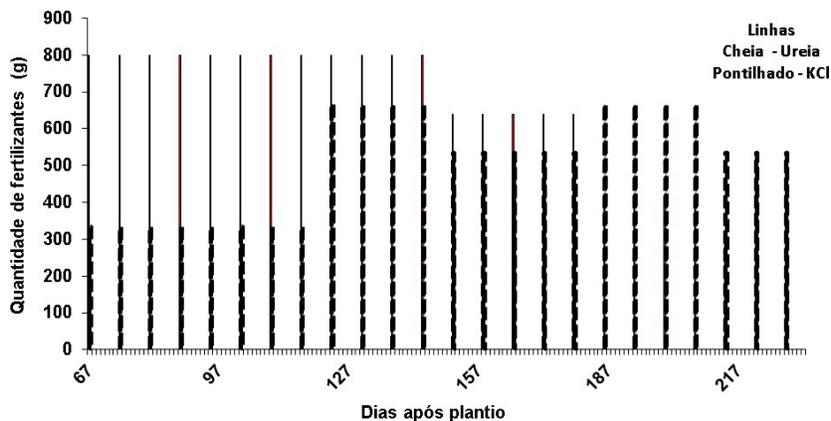


Figura 3. Cronograma das doses aplicadas de ureia e cloreto de potássio nos tratamentos 50% ETo e 100% ETo.

Manejo da cultura

Em Teresina, os ensaios foram mantidos livres de ervas daninhas pela realização de capinas manual entre as fileiras de plantas até que a cultura ocupasse todo o espaço livre entre as fileiras de plantas.

Modelagem do desenvolvimento e da produtividade da cana-de-açúcar

Entre os modelos desenvolvidos para acompanhar, o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cana-de-açúcar, o DSSAT-CANEGRO tem sido largamente utilizado em diversos países. Esse modelo envolve processos matemático-fisiológicos da cultura e pode ser aplicado em diversos ecossistemas.

Os princípios e as descrições do modelo DSSAT-CANEGRO podem ser visualizados na Figura 4, que, resumidamente, apresenta um esquema dos principais processos para a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar.

Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologias (Decision Support System for Agrotechnology Transfer – DSSAT)

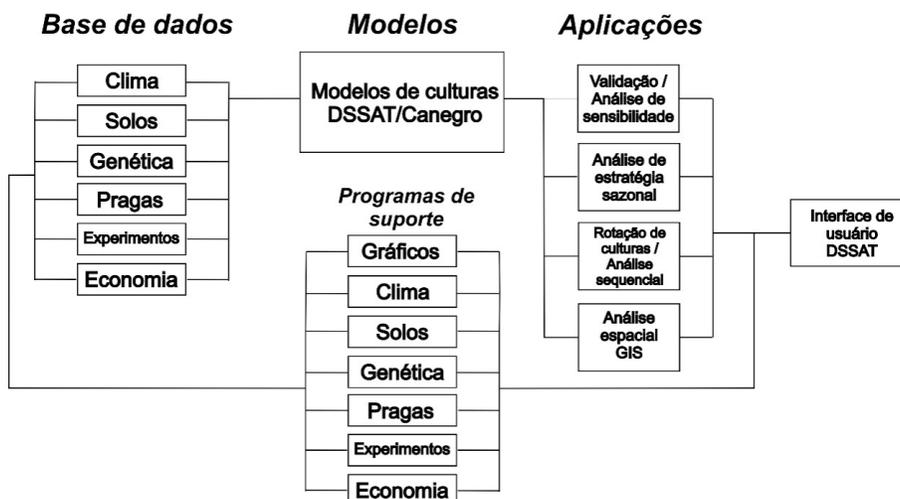


Figura 4. Representação esquemática da base de dados, aplicações e componentes do programa e o seu uso e relações com o modelo CANEGRO e o sistema DSSAT (adaptado de Jones et al., 2002).

Os parâmetros da cultura utilizados para simulação foram provenientes das validações de Nassif (2010); Barros (2011); Barros et al. (2012) e Marin et al. (2012) (Tabela 5).

Tabela 5. Principais parâmetros utilizados no DSSAT-CANEGRO para simulação com a cultivar RB-867515.

Parâmetro	Descrição	Unidade	Valor
PARCEMAX	Eficiência de conversão da radiação	g MJ ⁻¹	12,9
APFMX	Fração da partição para a parte aérea	fração	0,9
STKPFMAX	Fração do colmo da biomassa da parte aérea	fração	0,69
LFMAX	Número máximo de folhas verdes	Folhas/ colmo	10
MXLFAREA	Área da maior folha	cm ²	546
MXLFARNO	Número da maior folha	nº	18
PI1	Intervalo de filocrono 1 – folhas mais novas que Pswitch	GD	89

Continua...

Tabela 5. Continuação.

PI2	Intervalo de filocrono 2 – folhas mais velhas que Pswitch	GD	107
PSWITCH	Número da folha quando ocorre a mudança do filocrono	nº	18
TTPLNTEM	Graus-dia para emergência da cana-planta	GD	408
TTRATNEM	Graus-dia para a emergência da cana-soca	GD	291
CHUIBASE	Graus-dia para o início do crescimento do colmo	GD	855
TT_POPGROWTH	Graus-dia para ocorrência do pico de perfilhamento	GD	650
MAX_POP	Pico de população de perfilhos	nº m ⁻²	24
POPTT16_	População final de perfilhos	nº m ⁻²	10

Compilado e adaptado de Nassif (2015).

Resultados

Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar irrigada – Teresina, PI

Os dados de precipitação pluviométrica e temperaturas máximas e mínimas do ar, durante o período de cultivo da cana-de-açúcar, safra 2011/2012, podem ser observados na Figura 5. O total de precipitação pluviométrica foi 1.584 mm, e as temperaturas mínimas e máximas do ar oscilaram entre 22 °C e 33 °C, respectivamente.

Pode-se notar que a pluviometria foi relativamente bem distribuída, mas ocorrendo eventos de chuvas diárias superiores a 80 mm. Além disso, a partir dos 200 dias após o plantio (DAP), as chuvas foram registradas em praticamente todos os dias, encerrando por volta dos 300 DAP.

Pode-se notar, ainda, que a distribuição de chuvas durante o período de crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar beneficiou o ensaio com 50% da ETo, haja vista que, no final do ciclo, a diferença entre os dois ensaios do total de chuva mais irrigação foi de apenas 134 mm, distribuído ao longo do ciclo da cultura.

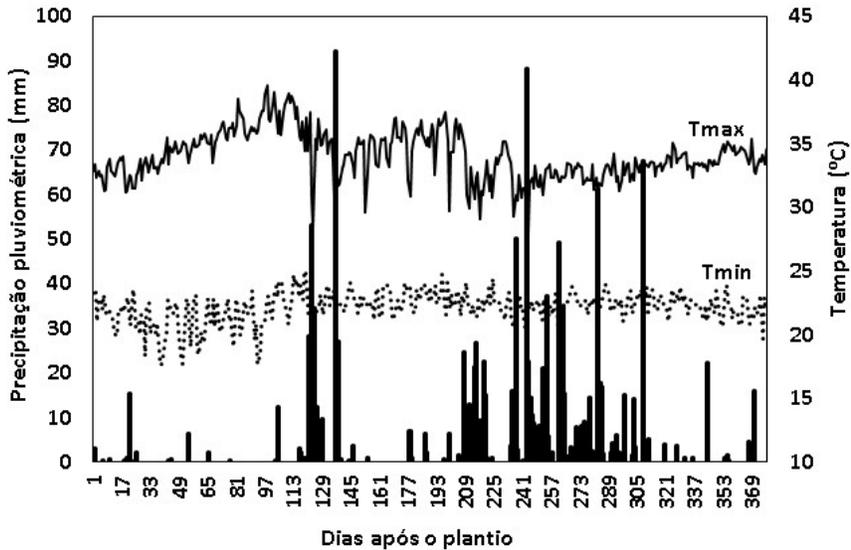


Figura 5. Dados climáticos do ano safra 2011/2012, coletados no experimento de cana-de-açúcar, em Teresina, PI.

Na Tabela 6, podem-se observar os valores medidos e estimados na colheita, da produtividade de colmos, do índice de área folia (IAF) e do acúmulo de açúcares totais para os ensaios irrigados com 50% e 100% da ETo. O valor de produtividade de colmo estimado, com 100% da ETo foi de 171 Mg ha⁻¹, enquanto que, em base experimental irrigado, o valor medido foi de 197 Mg ha⁻¹. Para o ensaio com 50% da ETo, o valor estimado foi de 168 Mg ha⁻¹ e o medido de 181 Mg ha⁻¹. Em valores absolutos, as diferenças entre o valor medido e o estimado foram da ordem de 13% e 7%, para os ensaios de 100% e 50% da ETo, respectivamente.

É provável que o pequeno nível de estresse hídrico do ensaio 50% da ETo tenha mantido a produtividade da cultura, considerando que a diferença entre os valores medidos dos dois ensaios, foi de apenas 16 Mg ha⁻¹. De fato, dependendo do nível de estresse, o baixo potencial hídrico pode estimular as reações adaptativas que capacitam as plantas a sobreviverem em períodos de estresse, o que pode alterar as taxas de crescimento e desenvolvimento (Bursens et al., 2000).

Como se pode observar, esses resultados para avaliação de modelos de processos, que objetivam simular a produtividade agrícola final, são diferenças consideradas admissíveis.

Os valores medidos de IAF e de açúcares totais na colheita para 100% da ETo foram de $0,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $0,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, e para 50% da ETo, 25 Mg ha^{-1} e 26 Mg ha^{-1} , respectivamente. Os valores estimados na colheita para os ensaios de 100% e 50% da ETo foram de 20 Mg ha^{-1} para ambos os ensaios, com diferenças da ordem de 5 Mg ha^{-1} a 6 Mg ha^{-1} , respectivamente (Tabela 6).

O modelo DSSAT-CANEGRO, uma vez calibrado pode apresentar resultados compatíveis, notadamente, quando estão sob regime hídrico e recomendação de fertilidade adequados. Além disso, o DSSAT pode ser utilizado para estudos de potencial de produção em diferentes ambientes (Knox et al., 2010; Singels et al., 2010; Marin et al., 2011).

Tabela 6. Valores medidos e estimados na colheita das principais variáveis da variedade RB-867515, ano safra 2011-2012.

Variável	Medido na colheita		Estimado na colheita	
	100% ETo	50% ETo	100% ETo	50% ETo
Produtividade colmos (Mg ha^{-1})	197	181	171	168
Índice de área foliar (IAF) ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$)	0,7	0,6	1,4	1,2
Total de açúcares (Mg ha^{-1})	25	26	20	20

Na Figura 6, pode-se verificar o comportamento da simulação de produtividade de colmos dos ensaios irrigados com 100% e 50% da ETo. No período entre 120 DAP e, aproximadamente, 180 DAP, a variedade BR-867515, com 50% da ETo, teve o crescimento do colmo menor do que o ensaio com 100% da ETo, indicando fatores restritivos ao crescimento. Nesse período, os totais de precipitação pluviométrica foram restritivos (Figura 5).

As lâminas de irrigação de 100% e 50% da ETo foram aplicadas a partir dos 103 DAP até os 190 DAP. Pode-se verificar, por meio da Figura 5, que os totais de precipitação pluviométrica a partir de 181 DAP aumenta sucessivamente, até alcançar valores superiores a 50 mm, permitindo a recuperação do crescimento de colmos da variedade RB 867515 com 50% da ETo a níveis similares ao ensaio com 100% da ETo no final do ciclo.

Os períodos de crescimento e de maturação dos colmos são considerados os estádios de desenvolvimento mais importantes na cana-de-açúcar. A fase de maturação tem seu início por volta dos 240 dias até o final do ciclo. Diversos estudos indicam que o estresse hídrico na cana-de-açúcar no momento ideal pode ampliar o tempo de exploração da planta no campo, aumentando o número de colheitas e tornando o rendimento mais eficiente, principalmente na fase de alongamento dos colmos, fase em que ocorre o enriquecimento em sacarose (Trintinalha et al., 2004; Inman-Bamber et al., 2005; Dalri et al., 2008).

É provável que essa recuperação tenha ocorrido pelo fato de que as plantas, em condições de estresse acumulam açúcares, aminoácidos, aminas, ácidos orgânicos, íons, entre outros solutos (Bartels; Sunkar, 2005), que podem ser aproveitados, logo após as condições serem mais favoráveis. De fato, esse comportamento pode ser observado quando se verificam os valores de açúcares totais para ambos os ensaios (Figura 7).

A Figura 7 mostra o acúmulo de açúcares totais nos dois regimes de irrigação. Fica evidenciado, na simulação com o modelo DSSAT-CANEGRO, que o estresse hídrico imposto para a simulação com 50% da ETo favoreceu o rendimento de açúcares totais.

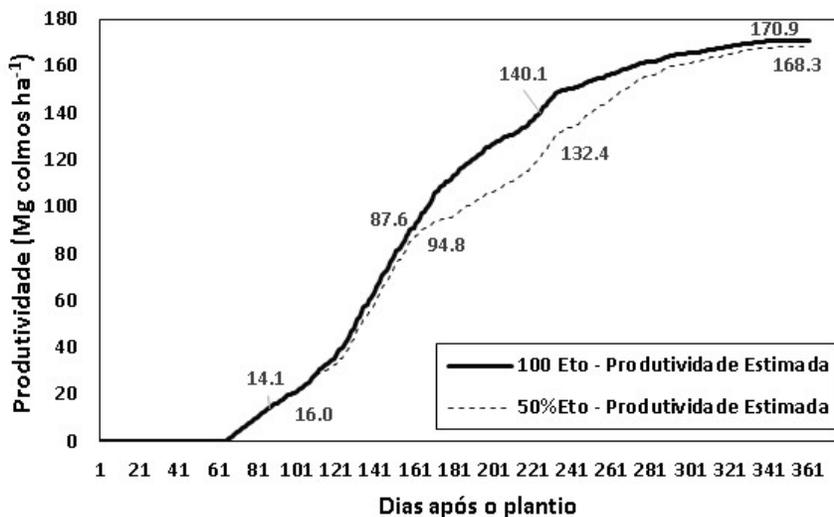


Figura 6. Produtividade de colmo de cana-de-açúcar estimada para a variedade RB 867515, referente a ambos os tratamentos na safra 2011/2012.

A partir dos 200 dias após o plantio (DAP), observa-se que a produtividade de colmos (Figura 6) e a produção de açúcares (Figura 7), em ambos os tratamentos, ficam com crescimento vegetativo lento, praticamente constante. No entanto, retomada a ocorrência de chuvas constantes a partir dos 240 DAP e temperaturas mais baixas, o armazenamento de açúcares volta a crescer, com maior intensidade, iniciando um período de maturação final (Figura 7).

O índice de área foliar (IAF) é a razão entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo ($m^2 m^{-2}$). Ele está diretamente relacionado com a produção de biomassa pelo dossel, com a radiação e com a evapotranspiração. É, de fato, um indicador de referência do crescimento da cultura. Na Tabela 7 e na Figura 8, podem ser observados os valores estimados e medidos do índice de área foliar (IAF), em quatro fases, durante o período da primeira safra (2011/2012), para os ensaios de 100% e 50% da ETo.

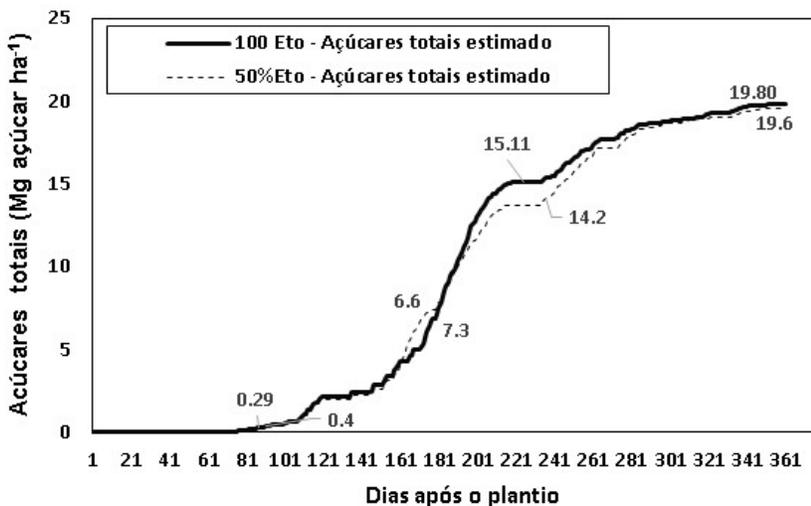


Figura 7. Acúmulo de açúcares totais estimado da cultura da cana-de-açúcar para a variedade RB-867515, referente a ambos os tratamentos na safra 2011/2012.

Observa-se que, apenas nos períodos entre 173 e 235 DAP, os valores de IAF estimados, em ambos os tratamentos, tendem a se aproximar dos valores medidos (Figura 8). Embora em ambos os tratamentos os valores medidos de IAF sejam menores do que os estimados, nota-se o mesmo comportamento na posição dos valores medidos, durante o período de desenvolvimento da cultura.

Tabela 7. Índice de área foliar (IAF), medido e estimado, para os ensaios 100% e 50% da ETo, durante quatro fases do ciclo de crescimento da cultura da cana-de-açúcar, ano safra 2011-2012.

DAP	Medido		Estimado	
	100% ETo	50% ETo	100% ETo	50% ETo
89	1,49	1,18	0,50	0,48
173	2,80	1,82	3,50	2,49
235	3,20	3,11	3,60	3,67
360	0,70	0,60	1,40	1,20

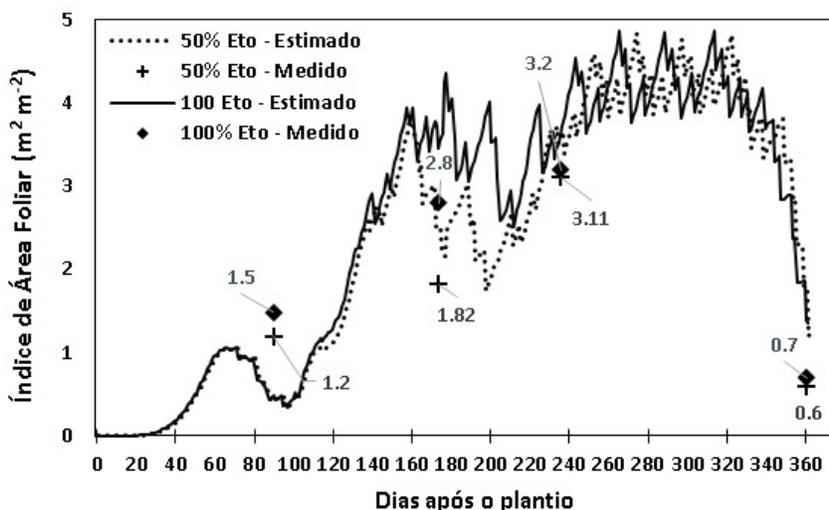


Figura 8. Índice de área foliar (IAF) da cultura da cana-de-açúcar estimado para 100% da ETo (linha cheia) e 50% da ETo (tracejada) para a variedade RB-867515, indicando os valores de IAF medidos (100% da ETo: triângulo; 50% da ETo: cruz), referente ao ano safra 2011/2012.

A variação do IAF durante todo o ciclo de uma cultura é de extrema importância para que se possa modelar o crescimento e o desenvolvimento, além de quantificar o aumento em massa da planta, dentro de um intervalo de tempo e o aparecimento das fases da cultura e, em consequência, a produtividade e a produção total da cultura (Teruel, 1995).

Na Figura 9, pode-se detectar que os valores de radiação solar e de radiação fotossinteticamente ativa diminuem, fato que pode estar associado a diminuição dos níveis de produtividade (Figura 9). Esse comportamento pode estar relacionado a dois fatores, um relativo à diminuição dos níveis de radiação solar, e outro devido à disponibilidade de água. Além disso, a disponibilidade hídrica parece ter afetado também os níveis de fotossíntese da cultura.

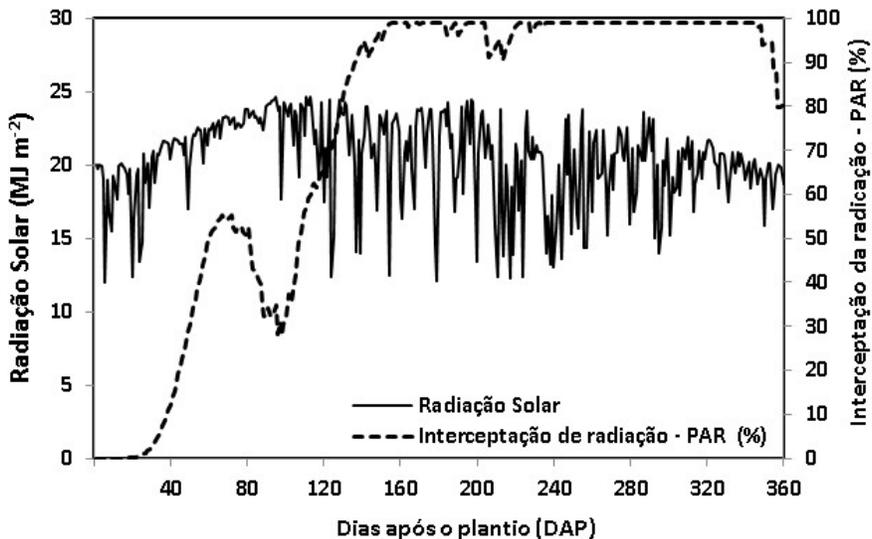


Figura 9. Níveis de radiação solar (linha sólida) e fração da radiação fotossinteticamente ativa – PAR (linha tracejada), durante a safra 2011/2012.

Na Figura 10, verifica-se que, entre o período de 200 DAP e 240 DAP, os valores maior (1) e menor (0) do nível de estresse hídrico, que indica a relação entre a evapotranspiração potencial e evapotranspiração da cultura (ETP/ETc), que afetam a fotossíntese, ficaram na ordem de 0,5, ou seja, houve uma diminuição de 50% da fotossíntese. Para o regime de 50% da ETo, o nível de estresse alcançou valores de 0,9. Esses resultados sugerem que o modelo DSSAT-CANEGRO é muito sensível aos níveis de radiação e de estresse hídrico.

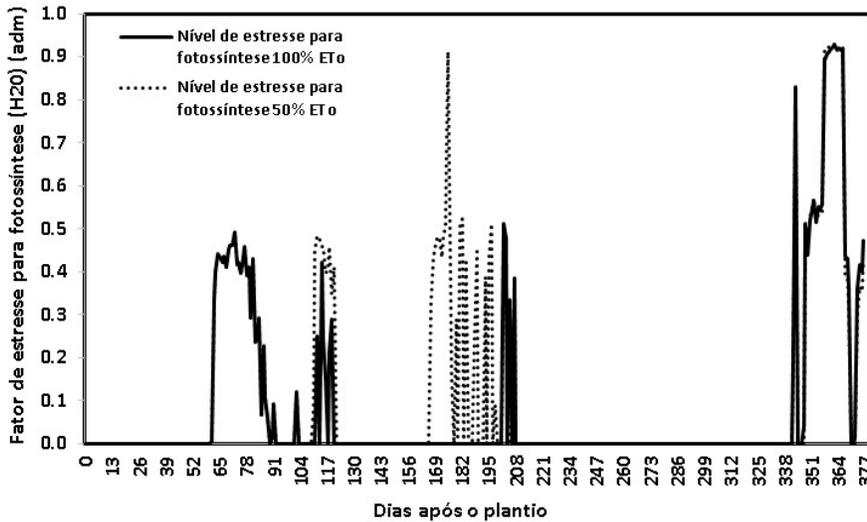


Figura 10. Níveis de estresse hídrico simulado para regime de irrigação com 100% da ET₀ (linha sólida) e 50% da ET₀ (linha tracejada).

Nesse sentido, pode-se inferir que as variações no conteúdo de água no solo provocam variações na produtividade da cana-de-açúcar, principalmente se essas variações ocorrerem em períodos de acumulação de açúcares.

Segundo Robertson et al. (1999), na fase inicial de crescimento, o deficit hídrico, embora apresente grandes impactos na área foliar, no perfilhamento e no acúmulo de biomassa, teve pouco impacto no rendimento final da cana-de-açúcar em ambiente de sequeiro e irrigado. No entanto, o deficit hídrico imposto quando o dossel estava bem estabelecido e com índice de área foliar (IAF) superior a 2 teve maior impacto no rendimento final da biomassa total, biomassa de colmos, e na sacarose nos colmos. Essa tendência também foi observada no presente estudo, já que a imposição dos níveis de estresse hídrico ocorreu na fase inicial de desenvolvimento da cultura.

Embora o experimento tenha sido irrigado com 100% e 50% da ET₀, o sistema de gotejamento pode apresentar limitação de umedecimento em profundidades de solos superiores a 70 cm, o que também pode afetar a hidratação do sistema radicular em profundidade.

Apesar de o modelo estimar valores de produtividade de colmos próximos aos valores medidos em campo, chama-se a atenção para o fato de que, quando extrapolados para grandes áreas, podem produzir maiores erros na estimação.

É importante observar, ainda, que trabalhos como este têm algumas vantagens e limitações inerentes e que devem ser ressaltadas. Geralmente, os dados simulados de produtividade incluem uma incerteza relativamente grande devido à não uniformidade de métodos de comparação, principalmente quando é comparado também com outros trabalhos dessa natureza; principalmente quando não há muitos trabalhos no Brasil para avaliações por fertirrigação.

Os parâmetros utilizados são validados para determinado ambiente e dificilmente representam a heterogeneidade dos ambientes. Além disso, por vezes, são oriundos de ambientes muito distintos daqueles para os quais foram desenvolvidos e testados.

Apesar das limitações, o modelo DSSAT-CANEGRO apresenta um conjunto de informações importantes que podem ser utilizadas para avaliar o potencial do ambiente sob diferentes condições de clima e solo.

Dessa forma, pode-se concluir que os resultados das simulações com o modelo DSSAT-CANEGRO com relação à produtividade de colmos e ao acúmulo de açúcar total foram adequados, quando comparados aos dados medidos em campo.

Com relação ao acompanhamento do Índice de área foliar (IAF), os resultados entre dados medidos e estimados foram próximos, principalmente do meio e no final do ciclo.

Conclusões

1. Os resultados das estimativas com o modelo DSSAT-CANEGRO são semelhantes aos dados observados, notadamente com relação à produtividade de colmos e ao acúmulo de açúcar total;
2. de forma geral o modelo DSSAT pode auxiliar para estudos de produtividade da cultura da cana-de-açúcar, notadamente, quanto à produtividade no rendimento de açúcares totais;
3. apesar das limitações, o modelo DSSAT-CANEGRO apresenta um conjunto de informações importantes que podem ser utilizadas para avaliar o potencial do ambiente sob diferentes condições de clima e solo.

Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO**: Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q.; DUARTE, J. A. L.; BRAGA, D. L.; NOLETO, D. H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 1, p. 76-84, 2012.

BARROS, A. C. **Utilização do modelo CANEGRO para estimativa da produtividade de cana-de-açúcar irrigada em diferentes regiões do Brasil**. 2011. 128 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

BARROS, A. C; COELHO, R. D; MARIN, F. R; POLZER, D. L; NETTO, A. O. A. Utilização do modelo CANEGRO para estimativa de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e não irrigada para as regiões de Gurupi – TO e Teresina - PI. **Revista Irriga**, v. 17, n. 2, p. 189 – 207, 2012.

BARTELS, D.; SUNKAR, R. Drought and salt tolerance in plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 24, n. 1, p. 23-58, 2005.

BURSENS, S.; HIMANEN, K.; VAN de COTTE, B.; BEECKMAN, T.; VAN MONTAGU, M.; INZÉ, D.; VERBRUGGEN, N. Expression of cell cycle regulatory genes and morphological alterations in response to salt stress in *Arabidopsis thaliana*. **Planta**, v. 211, n. 5, p. 632-640, 2000.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - v. 4 - Safra 2017/18, n. 2 - Segundo levantamento**. Brasília, DF, 2017b. p.1-73. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_08_24_08_59_54_boletim_cana_portugues_-_2o_lev_-_17-18.pdf>. Acesso em 10 nov. 2017.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L.; GARCIA, C. J. B.; DUENHAS, L. H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, v. 13, n. 1, p. 1-11, 2008.

- DAVIS, E.; OLIVEIRA, R. A. de; SOUZA, G. V. de. (Org.). **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar**. Curitiba, PR: Graciosa, 2015. 156 p.
- DOURADO NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. Principles of Crop Modeling: I. Uses of Mathematical Models in Agricultural Science. **Scientia Agricola**, v. 55, p. 46-50, agosto, 1998.
- FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M.; DANTAS NETO, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.
- GAVA, G. J. de C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. C.; JERONIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; KÖLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011.
- HARTL, C. E. The third study of water and cane ripening. **Hawaiian Plrs'Rec**, v. 43, p. 145-58, 1939.
- HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; LIZASO, J. I.; WHITE, J. W.; URYASEV, O.; OGOSHI, R.; KOO, J.; SHELA, V.; TSUJI, G. Y. 2015. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 (www.DSSAT.net)**. Washington: DSSAT Foundation.
- INMAN-BAMBER, N. G.; KIKER, G. CANEGRO 3.10. DSSAT version 3.1 1998 distribution software. Honolulu: University of Hawaii, 1997. 78 p.
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2, p.185-202, 2005.
- JONES, J. W.; G. HOOGENBOOM; C. H. PORTER; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U; GIJSMAN, A. L.; RITCHIE, J. T. DSSAT Cropping System Model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 235-265, 2003.
- KNOX, J. W.; RODRÍGUEZ DÍAZ, J. A.; NIXON, D. J.; MKHWANAZI, M. A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. **Agricultural Systems**, v. 103, p. 63-72, 2010.
- MAPA. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-deacucar>>. Acesso em 10 out. 2016.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J. L.; PALLONE FILHO, W. J.; NASSIF, D. S. P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for sugarcane Brazilian productions systems. **Agronomy Journal**, v. 103, p. 100-110, 2011.
- MELO, F. B.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; PESSOA, B. L. O. **Levantamento, zoneamento e mapeamento pedológico detalhado da área experimental da Embrapa Meio-Norte em Teresina, PI**. Teresina, PI: Embrapa Meio-Norte, 2014. 47 p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 231).
- NASSIF, D. S. P. **Evapotranspiração, transpiração e trocas gasosas em canavial irrigado**. 2015. 124 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

NASSIF, D. S. P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO. **RB86-7515**. Disponível em: <<http://www.canaufv.com.br/cultivaresRB/RB867515%20.pdf>> Acesso em: maio 2017.

ROBERTSON, M. J.; INMAN-BAMBER, N. G.; MUCHOW, R. C.; WOOD, A. W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, v. 64, p. 211-227, 1999.

SINGELS, A.; VAN DER BERG, M.; SMIT, M. A.; JONES, M. R.; VAN ANTWERPEN, R. Modelling water uptake, growth and sucrose accumulation of sugarcane subjected to water stress. **Field Crops Research**, v. 117, p. 59-69, 2010.

TERUEL, D. A. **Modelagem do índice de área foliar da cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos**. 1995. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

TRINTINALHA, M. A.; GONCALVES, A. C. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; FOLEGATTI, M. V.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R. Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 26, n. 3, p. 353-360, 2004.