**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Parametrização do modelo CANEGRO (DSSAT) e caracterização
biométrica de oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por
gotejamento**

Daniel Philipe Veloso Leal

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2016**

Daniel Philipe Veloso Leal
Engenheiro Agrônomo

**Parametrização do modelo CANEGRO (DSSAT) e caracterização biométrica de
oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **Rubens Duarte Coelho**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Leal, Daniel Philipe Veloso

Parametrização do modelo CANEGRO (DSSAT) e caracterização biométrica de oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento / Daniel Philipe Veloso Leal. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2016. 238 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Modelagem 2. Parâmetros 3. Biometria 4. Irrigação 5. Simulação I. Título

CDD 633.61
L435p

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

À minha esposa, meus pais e irmãos pelo apoio
incondicional em todos os momentos.

Dedico

AGRADECIMENTOS PESSOAIS

A Deus, por sempre me dar sabedoria e inteligência, por me iluminar e guiar durante esta caminhada.

Aos meus pais José Ivivaldo e Sandra Veloso pelo amor, carinho e todo o apoio antes e durante mais esta fase da minha vida, sem vocês nada disso seria possível.

Agradeço em nome dos meus irmãos Dyhogo e Mayra, os demais familiares que de uma maneira ou de outro contribuíram para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

A minha esposa Paula, pelo carinho, amor e apoio incondicional. Poucos sabem das batalhas e dificuldades que já enfrentamos juntos desde maio de 2010, sempre com a graça de Deus estivemos fortes e lúcidos em busca dos nossos objetivos. Obrigado por tudo.

Aos amigos e companheiros de residência desde o mestrado Fábio, Leandro, Ranieri, Matias, Acácio, Dênis pelos bons momentos vividos durante este período.

Aos amigos da “República do Galo” João Paulo, Hermes, Ananias, Fernando, Vitor e demais agregados pelos diversos churrascos, comemorações, resenhas esportivas e políticas, grandes momentos.

Aos meus “sempre” orientadores e amigos João Batista, Polyanna Mara, Fúlvio e Édio, que de certa forma me ajudaram durante este caminho.

Muito Obrigado!

AGRADECIMENTOS PROFISSIONAIS

Ao meu orientador, Prof. Rubens Duarte Coelho que desde o mestrado acreditou não só no meu potencial como na minha pessoa, pois mesmo sem matrícula convidou-me para um semestre como ouvinte. Obrigado pela ajuda, amizade, ensinamentos, conselhos, estou sem palavras para agradecer estes seis anos.

Aos meus amigos e companheiros de projeto e da equipe do Rubens: Lucas Santos, Fernando Barbosa, Eusímio Fraga, Timóteo Barros, Jonathan Lizcano, Robson Mauri, Rafael Maschio, Marcos Amaral, Nathalia Ribeiro, José Guilherme, Jefferson Oliveira e Alex Nunes, foram quatro anos de muita dedicação e trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP e à Empresa Odebrecht Agroindustrial, que através do Projeto PITE 2012/50083-7 disponibilizaram os recursos financeiros necessários para a realização deste projeto de pesquisa e para meu treinamento no exterior, podendo participar do "*DSSAT 2014 International Training Program*" realizado em Griffin na Georgia - EUA.

Aos colaboradores da Empresa Odebrecht Agroindustrial, Engenheiros Américo Ferraz Dias Neto e Bernardo Yasuhiro Ide, pelas sugestões e experiências compartilhadas nas visitas e reuniões científicas realizadas ao longo do experimento.

Aos Srs. Carlos Calmanovici e Frederico Ramazzine Braga pelo apoio administrativo relacionado à gestão do contrato com a Empresa Odebrecht.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI) em especial ao Prof. Dr. José Antonio Frizzzone, aos Engenheiros Yoran Kontral, Daniel Pedroso, Marcos Kawasse e Daniel Neves (Empresa Netafim), Dr. Marcio Santos (Empresa Lindsay), Prof. Derrel Martin (University of Nebraska), Prof. Ronnie D. Green (Water for Food Institute), Engenheiros Urubathan Palhares Klink, José Guilherme Scanavini (CanaVialis - Monsanto) e Dr. Geoff Inman-Bamber (CSIRO-Austrália) pelo apoio no encaminhamento deste projeto de pesquisa.

Aos colegas e demais amigos da pós-graduação, Hermes, João Paulo, Jefferson José, Bruno Lena, Bruno Araújo, Bruno Marçal, Osvaldo, Magda, Rafael Dreux, Everaldo, Carlos, Acácio, Daniel, Lucas Vellame, Lucas Faria, Renato, Sérgio, Conan, Cícero, Diego, Éder, Otávio, Pedro, Isaac, Vanessa, Leonardo, Wagner, Roberto pela ajuda não só na coleta dos dados discussão dos resultados,

mas também no meu crescimento profissional. Aos estagiários de iniciação científica, Liz R. de Oliveira e Vinícius Perin, agradeço por integrarem a equipe do projeto e não medirem esforços para condução deste experimento. Aos demais estagiários temporários, Ailson, Bruno, Evandro, Jair, Luiz Paulo e Maximilian que contribuíram para montagem ou condução do experimento.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e a Universidade de São Paulo (USP).

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas (PPGESA) pela oportunidade de realização do mestrado e posteriormente o doutorado.

Ao Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB), pela disponibilização de material e espaço para o desenvolvimento deste projeto, às secretárias; Angela, Beatriz e Davilmar, aos funcionários; Afonso, Agnaldo, Sr. Antonio, Antonio (Gauchinho), Áureo, Ezequiel, Gilmar, Hélio, José Geraldo, Juarez, Luiz, Marinaldo e Paula, agradeço a todos pela ajuda e companheirismo durante esse período.

Ao Prof. Dr. Sérgio Nascimento Duarte, Prof. Dr. Fábio Ricardo Marin e ao Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva agradeço pela compreensão, sugestões e dicas valiosas no meu processo de exame de qualificação. Aproveito para agradecer os demais professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas, em especial Tarlei A. Botrel, Patrícia Angélica Alves Marques, Marcos V. Folegatti, Jarbas H. de Miranda, José Antônio Frizzone pelas orientações e ensinamentos compartilhados nas disciplinas e conversar informais.

Agradeço ao Dr. Allan Cunha Barros pela ajuda nas simulações e parametrização, sempre disposto a auxiliar sem medir esforços.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES) e a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG – João Batista e Polyanna Mara), instituições que me prepararam e que me deram condição de continuar os estudos. A FAZU que tem proporcionado oportunidade de colocar em prática conhecimentos adquiridos ao longo desta caminhada.

Por fim agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para realização deste momento.

SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABELAS	25
1 INTRODUÇÃO	31
Referências	32
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
2.1. Origem e Expansão Geográfica da Cana-de-açúcar	35
2.2. Morfologia	36
2.2.1. Colmo.....	36
2.2.2. Sistema Radicular	37
2.2.3. Folha	39
2.2.4. Ciclo e Fases de Cultivo	42
2.3. Fatores Ambientais	46
2.3.1. Radiação Solar	46
2.3.2. Temperatura do ar	48
2.4. Fatores edáficos	49
2.5. Irrigação e Relações Hídricas de Cana-de-açúcar	50
2.6. Modelagem na agricultura.....	53
2.7. Modelagem em cana-de-açúcar	55
2.7.1. CANEGRO	56
Referências	60
3 CARACTERÍSTICAS BIOMÉTRICAS, PRODUTIVIDADE DE MASSA FRESCA E SACAROSE DE OITO VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB QUATRO NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO	71
Resumo.....	71
Abstract.....	71
3.1. Introdução	72
3.2. Material e Métodos	73
3.2.1. Considerações Iniciais	73
3.2.2. Caracterização da Área Experimental	73
3.2.3. Delineamento Experimental	74
3.2.4. Enchimento das Parcelas Experimentais.....	77

3.2.5.	Caracterização química e físico-hídrica dos solos	78
3.2.6.	Sistema / Manejo da irrigação e fertirrigação	80
3.2.7.	Plantio, Cultivo e tratos culturais	85
3.2.8.	Variáveis Analisadas	86
3.2.8.1.	Área foliar	86
3.2.8.2.	IAF	88
3.2.8.3.	Sacarose	88
3.2.8.3.1.	Brix do caldo - Brix ($^{\circ}$ Brix)	89
3.2.8.3.2.	POL da cana-de-açúcar - POL (%).....	89
3.2.8.4.	Massa Fresca de Colmos.....	91
3.2.8.5.	Biomassa seca da parte aérea das plantas - BIOM (g)	91
3.2.8.6.	Número de perfilhos por touceira	92
3.2.8.7.	Número de folhas verdes e Folhas secas	92
3.2.9.	Análise Estatística	92
3.3.	Resultados e Discussão	92
3.3.1.	Irrigações (Demanda Hídrica)	92
3.3.2.	Área Foliar e IAF	97
3.3.3.	Sacarose	109
3.3.3.1.	Brix	109
3.3.3.2.	Sacarose aparente da Cana-de-Açúcar – (% Pol da Cana)	110
3.3.4.	Biomassa Fresca de Colmos (TCH, $t\ ha^{-1}$).....	112
3.3.5.	Biomassa Seca da Parte Aérea – BIOM	117
3.3.6.	Número de perfilhos vivos por metro quadrado.....	121
3.3.7.	Número de folhas verdes e Folhas secas	124
3.3.8.	Altura de Colmos.....	126
3.3.9.	Número, comprimento e diâmetro de entrenós	129
3.4.	Conclusões.....	133
	Referências.....	133
4	DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO MODELO CANEGRO/DSSAT PARA DIFERENTES VARIEDADES BRASILEIRAS.....	139
	Resumo....	139
	Palavras Chave: Modelagem, Parametrização, Parâmetros de cultivares, Cana-de-açúcar.....	139
	Abstract.....	139

4.1.	Introdução	140
4.2.	Material e métodos	141
4.2.1.	Caracterização da Área Experimental	141
4.2.2.	Caracterização química e físico-hídrica dos solos	142
4.2.3.	Sistema / Manejo da irrigação e fertirrigação	144
4.2.4.	Variedades	149
4.2.5.	Variáveis avaliadas e monitoradas	149
4.2.5.1.	Dados edáficos e climatológicos	149
4.2.5.2.	Tempo Térmico	150
4.2.6.	Parâmetros Mensurados e Estimados	151
4.2.6.1.	Área Foliar (LFMAX, MXLFAREA, MXLFARNO)	151
4.2.6.2.	Filocrono (PI, PI2, PSWITCH)	152
4.2.6.3.	MAX_POP , TT_POPGROWTH e POPTT16	154
4.2.6.4.	TTPLNTEM e TTRATNEM	154
4.2.6.5.	CHUIBASE	154
4.3.	Resultados e Discussão	155
4.3.1.	Dados Climáticos	155
4.3.2.	Dados da Cultura	158
4.3.2.1.	Área Foliar (LFMAX, MXLFAREA, MXLFARNO)	158
4.3.2.2.	Filocrono	163
4.3.2.3.	MAX_POP , TT_POPGROWTH e POPTT16	168
4.3.2.4.	TTRATNEM	170
4.3.3.	Resumo dos parâmetros de cultivares mensurados e calibrados	170
4.3.4.	Parâmetros Ecótipos	172
4.3.4.1.	Equações quadráticas da Área foliar, Largura máxima e Comprimento de folhas	173
4.3.4.2.	Temperatura base para aparecimento de folhas	180
4.3.5.	Resumo dos Parâmetros de Ecótipos	180
4.3.6.	Parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO	181
4.4.	Conclusões	202
	Referências	202
5	ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE MASSA FRESCA DE COLMOS E SACAROSE PARA UNIDADE AGROINDUSTRIAL RIO CLARO, CAÇU-GO	207
	Resumo	207

Abstract.....	207
5.1. Introdução	208
5.2. Material e Métodos	209
5.2.1. Dados climatológicos.....	209
5.2.2. Dados edáficos.....	213
5.2.3. Dados Fisiológicos	214
5.2.4. Cenários das Simulações.....	214
5.3. Resultados e discussão.....	215
5.3.1. Análise da produtividade de massa fresca de colmos.....	215
5.3.2. Análise da Sacarose.....	227
5.4. Conclusões.....	234
Referências.....	234
ANEXO I.....	237

RESUMO

Parametrização do modelo CANEGRO (DSSAT) e caracterização biométrica de oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento

O Brasil é um dos países de maior destaque do setor sucroenergético, uma vez que detém a maior produção mundial de cana-de-açúcar e pouco mais de um terço da cana cultivada no mundo. O presente experimento teve como principal finalidade caracterizar detalhadamente oito variedades de cana-de-açúcar, utilizando esta caracterização como suporte para parametrização do modelo CANEGRO/DSSAT que por sua vez é uma importante ferramenta na tomada de decisão dos cultivos de cana-de-açúcar, sendo assim os objetivos neste trabalho foi realizar uma análise agrônômica e tecnológica de oito variedades de cana-de-açúcar, mensurar o máximo de parâmetros do modelo CANEGRO/DSSAT; efetuar a parametrização do CANEGRO/DSSAT para oito variedades de cana-de-açúcar; simular o processo de fotossíntese e partição de fotoassimilados, de modo a estabelecer um processo de Benchmarking da produtividade limite das principais variedades de cana-de-açúcar; simular o crescimento e produtividade da cana-de-açúcar no ambiente de produção do Cluster Caçú – GO da Empresa Odebrecht Agroindustrial, Caçú – GO. O experimento base foi conduzido em casa de vegetação, pertencente à área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’ (ESALQ/USP) localizada em Piracicaba – SP. O experimento foi delineado com três fontes de variação (FV), sendo: quatro épocas de amostragem, quatro lâminas de irrigação e oito variedades de cana-de-açúcar. As amostragens (épocas) foram realizadas trimestralmente, sendo a primeira, aproximadamente 100 dias após o corte da cana planta. As lâminas avaliadas (L50, L75, L100 e L75*) constituíram na reposição de frações da ETc tomando como referência o tratamento L100, em que se manteve a umidade do solo próximo capacidade de campo (θ_{cc}) em todo o experimento. As parametrizações foram realizadas baseadas nos dados coletados nas parcelas submetidas à lâmina L100. A etapa de simulações foi realizada para unidade Agroindustrial Rio Claro localizada em Caçú/GO pertencente a Empresa Odebrecht Agroindustrial. A produtividade de massa fresca de colmo é influenciada pela lâmina de irrigação já na segunda época de amostragem (~205 DAC), neste ponto há redução de 35% entre L100 e L50. Os parâmetros medidos apresentaram grande diferença em relação aos valores padrão do CANEGRO/DSSAT, principalmente CHUIBASE e TT_POPGROWTH. As variedades que obtiveram menores produtividades observadas em campo foram as que apresentaram os melhores índices estáticos relacionados quando simulado a produtividade de massa fresca. Nas simulações realizadas para Caçú-GO, a maior produtividade ($173,9 \text{ t ha}^{-1}$) foi alcançada pela variedade V2 no solo 1 em cultivo irrigado e a menor produtividade de massa fresca ($68,4 \text{ t ha}^{-1}$) ocorreu na variedade V7 no plantio de setembro em cultivo sequeiro no solo 3.

Palavras-chave: Modelagem; Parâmetros, Biometria, Irrigação, Simulação

ABSTRACT

Parameterization of CANEGRO (DSSAT) model and biometric characterization of the eight sugarcane varieties drip irrigated

Brazil is one of the countries with major sugarcane industry, as it holds the world's largest production of sugarcane and just over a third of the sugarcane area grown in the world. This experiment aimed to characterize in detail eight sugarcane varieties, as support for parameterization of CANEGRO model / DSSAT which in turn is an important tool in the decision making process of sugarcane crops, therefore the objectives of this study were to measure the maximum parameters of CANEGRO / DSSAT model; parameterize CANEGRO / DSSAT for eight varieties of sugarcane; simulating the process of photosynthesis and assimilate partitioning in order to establish a benchmarking process productivity limits of the main varieties of sugarcane; simulate the growth and productivity of sugarcane in the Cluster production environment Caçu - GO Agroindustrial Company Odebrecht, Caçu - GO. The basic experiment was conducted at the experimental area of the Department of Biosystems Engineering (LEB) of the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ / USP) located in Piracicaba - SP. The experiment was designed with three sources of variation (PV), as follows: four sampling times, four irrigation levels and eight varieties of sugarcane. Sampling (times) were held quarterly, with the first, approximately 100 days after cutting the plant cane. The evaluated blades (L50, L75, L100 and L75*) were the replacement fractions of ET_c with reference to the treatment L100, which kept the soil moisture near field capacity (θ_{cc}) throughout the experiment. The parameterization was carried out based on data collected at the 100 % irrigation depth (L100). The simulations were performed to Agroindustrial Rio Claro unit in Caçu / GO (Odebrecht Agroindustrial). The productivity of fresh culms was influenced by water depth in the second time of sampling (~ 205 DAC), at this point there is a reduction of 35% between L100 and L50. The measured parameters showed big difference compared to standard values CANEGRO / DSSAT mainly CHUIBASE and TT_POPGROWTH. The varieties with smaller yields observed in the field were the ones with the best static indexes related when simulated fresh culm productivity. In simulations performed to Caçu GO, the highest yield (173.9 t ha⁻¹) was accomplished by the V2 array 1 in the soil irrigated and the lowest fresh culm weight yield (68.4 t ha⁻¹) was in the range V7 in September planting in rainfed cultivation in soil 3.

Keywords Modeling; Parameters, Biometric, Irrigation, Simulation,

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Surgimento e desenvolvimento do perfilho e de raízes	38
Figura 2.2 – Detalhes da identificação foliar do “sistema Kuijper”	40
Figura 2.3 – Morfologia do colmo (A, B) e touceira (C) da cana-de-açúcar. (A), o colmo compreende uma série de nós separados por internós com gemas em lados alternados. (B), a folha pode ser dividida em a lâmina (b) com a nervura central (m) e a bainha (s). A aurícula (a), barbelas (d), e lígula (l) são também usados como características de diagnóstico. (C), Perfilhos secundários e terciários surgem a partir de gemas laterais na parte subterrânea de colmo original.	42
Figura 2.4 - Ilustração das fases de brotação e emergência, perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação dos colmos para cana-de-açúcar.	44
Figura 3.1 - Vista externa (A) e interna (B) da casa de vegetação; ao fundo a estufa de apoio.....	74
Figura 3.2 – Representação gráfica das frações das lâminas aplicadas durante a fase inicial de desenvolvimento e de crescimento dos colmos. Obs. A lâmina de referência é a lâmina do tratamento L100 de cada variedade	76
Figura 3.3 - Croqui do delineamento experimental.....	77
Figura 3.4 - Detalhe da divisão e enchimento das parcelas	78
Figura 3.5 – Vista da distribuição dos gotejadores nas parcelas experimentais	81
Figura 3.6 – Tensiômetros com transdutores de vácuo, utilizados para monitoramento da tensão do solo	81
Figura 3.7 – Sistema de aquisição e armazenamento de dados desenvolvidos no projeto de pesquisa	82
Figura 3.8 - Manejo da irrigação. Croqui do experimento destacando as parcelas onde foram coletados os dados de tensão de água no solo (A); Tensímetro digital de punção utilizado para coleta dos dados de tensão (B); Imagem da planilha no Software Microsoft Excel® utilizada para o manejo da irrigação (C).....	84
Figura 3.9 – Ranking das variedades em função dos tempos de irrigação	85
Figura 3.10 – Corte basal, quebra do ponteiro no colmo e separação das frações da cana-de-açúcar	86
Figura 3.11 – Integrador de Área Foliar LICOR “LI-3100C”	88
Figura 3.12 – Desintegração e homogeneização dos colmos (A); Detalhe da coleta da amostra homogeneizada representativa da parcela (B); Pesagem e prensagem	

do material para extração do caldo (C); Detalhe do caldo e bolo úmido obtidos após a prensagem (D); Refratômetro digital de bancada (Rudolph J47®) para leitura de Brix (E); Vista geral do processo de clarificação (F); Detalhe do caldo clarificado (G); Sacarímetro digital (Autopol I Rudolph®) para leitura sacarimétrica (H).	90
Figura 3.13 A - Média do Potencial mátrico do solo em função das variedades V1, V2, V3 e V4 nas profundidades de 10 cm (Ψ_{10}), 30 cm (Ψ_{30}) e 50 cm (Ψ_{50})	95
Figura 3.13 B - Média do Potencial mátrico do solo em função das variedades V5, V6, V7 e V8 nas profundidades de 10 cm (Ψ_{10}), 30 cm (Ψ_{30}) e 50 cm (Ψ_{50})	96
Figura 3.14 – Regressão entre massa de folhas e Área Foliar das oito variedades (V1), (V2), (V3), (V4), (V5), (V6), (V7), e (V8).....	99
Figura 3.15 – Área Foliar Verde (AF_V) e Total (AF_T), Índice de Área Foliar Verde (IAF_V) e Total (IAF_T), das variedades: (A) V1 e V2; (B) V3 e V4; (C) V5 e V6; (D) V7 e V8.....	104
Figura 3.16 – Área Foliar, de um único colmo, real e estimada pela Regressão entre Massa e Área Foliar, pela Equação de Hermann e Câmara (1999) e duas Equações adaptadas de Hermann e Câmara (1999): (1) com base no fator de forma calculado para cada repetição e (2) com base no fator de forma de todas as folhas +3.	105
Figura 3.17 – Fator de Forma de folhas verdes totalmente expandidas e não expandidas por variedade.....	106
Figura 3.18 – Fator de Forma das folhas (+7,+6,+5,+4,+3, +2, +1) das diferentes variedades de cana-de-açúcar nas quatro épocas de amostragem e fator de forma médio de cada folha.....	108
Figura 3.19 – Porcentagem de sólidos solúveis ($^{\circ}BRIX$) das quatro lâminas de irrigação em função de cada variedade em três épocas de amostragem (Época 2, Época 3 e Época 4)	110
Figura 3.20 – Porcentagem de sólidos solúveis ($^{\circ}BRIX$) das oito variedades de cana-de-açúcar em função das quatro lâminas de irrigação em três épocas de amostragem (Época 2, Época 3 e Época 4)	110
Figura 3.21 – Gráfico Box Plot para a produtividade (TCH) das oito variedades dentro de cada lâmina na primeira época de amostragem	115
Figura 3.22 – Gráfico Box Plot para a produtividade (TCH) das oito variedades dentro de cada lâmina na segunda época de amostragem	115
Figura 3.23 – Gráfico Box Plot para a produtividade (TCH) das oito variedades dentro de cada lâmina na terceira época de amostragem	116

Figura 3.24 – Gráfico Box Plot para a produtividade (TCH) das oito variedades dentro de cada lâmina na quarta época de amostragem	116
Figura 3.25 – Biomassa seca da parte aérea, $t\ ha^{-1}$, nas quatro lâminas dentro de cada variedade nas quatro épocas de amostragem.....	119
Figura 3.26 – Biomassa seca da parte aérea, $t\ ha^{-1}$, das oito variedades dentro de cada lâmina nas quatro épocas de amostragem.....	120
Figura 3.27 – Proporção média dos componentes: perfilho senescente (PM); bainha; folha; desponte e colmo na biomassa seca total da parte aérea das oito variedades, independente de lâmina nas quatro épocas de amostragem.....	120
Figura 3.28 – Número de perfilhos vivos por m^2 em função das variedades, das lâminas e das épocas de avaliação, (A) V1, V2, V3 e V4; (B) V5, V6, V7 e V8	123
Figura 3.29 – Número de folhas verdes (NFV) presentes nos colmos das oito variedades submetidas ao tratamento L100 em diferentes dias após a colheita	125
Figura 3.30 – Temperatura média do ar no interior da casa de vegetação ao longo do ciclo.....	125
Figura 3.31 – Altura média de colmos, em metros, ao longo do ciclo das variedades: (A) V1, V2, V3 e V4; (B) V5, V6, V7 e V8 submetidas ao tratamento L100.....	126
Figura 3.32 – Comprimento médio de cada entrenó em função das oito variedades, independentemente de lâminas	131
Figura 3.33 – Comprimento médio de cada entrenó das oito variedades submetidas à lâmina L100.....	132
Figura 3.34 – Comprimento médio de cada entrenó nas quatro lâminas de irrigação independente de variedades	132
Figura 4.1 - Vista externa (A) e interna (B) da casa de vegetação; ao fundo a estufa de apoio.....	142
Figura 4.2 – Irrigação Acumulada ao longo do ciclo das oito variedades de cana-de-açúcar.....	145
Figura 4.3 – Lâmina de Irrigação aplicada por irrigação das variedades V1, V2, V3 e V4.....	147
Figura 4.4 – Lâmina de Irrigação aplicada por irrigação das variedades V5, V6, V7 e V8.....	148
Figura 4.5 – Sensor Vaissala HMP45C - Campbell Sci, coleta temperatura máxima e mínima.....	150
Figura 4.6 – Integrador de Área Foliar LICOR “LI-3100C”	152

Figura 4.7 – Contagem/Marcação do aparecimento de folhas	153
Figura 4.8 – Ilustração do “Broken stick” abordagem para aparecimento de folhas, usado no Canegro, Singels, et al. 2008	154
Figura 4.9 – Variação Diária da Temperatura máxima, Temperatura mínima e radiação Total no interior da casa de vegetação	155
Figura 4.10 – Temperatura média no interior da casa de vegetação e do posto meteorológico da ESALQ/USP	156
Figura 4.11 – Acúmulo de graus dias ao longo do ciclo, considerando $T_b = 10^\circ \text{C}$. 157	
Figura 4.12 – Valores diários da Radiação no interior da casa de vegetação (RAD Interna), Radiação externa à casa de vegetação (RAD Externa) e relação entre a radiação interna e Externa (RAD Interna / RAD Externa)	158
Figura 4.13 – Gráfico box plot do número máximo de folhas verdes das oito variedades	159
Figura 4.14 – Área foliar individual em função do número da folha das variedades (V1), (V2), (V3) e (V4).....	161
Figura 4.15 – Área foliar individual em função do número da folha das variedades (V5), (V5), (V7) e (V8).....	162
Figura 4.16 – V1, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca	164
Figura 4.17 – V2, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca	164
Figura 4.18 – V3, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca	164
Figura 4.19 – V4, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca	165
Figura 4.20 – V5, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca	165
Figura 4.21 – V6, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca	165
Figura 4.22 – V7, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca	166
Figura 4.23 – V8, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca	166

Figura 4.24 – Gráfico Box-plot para os filocronos um e dois (PI_1 e PI_2) das oito variedades estudadas	166
Figura 4.25 – Número de perfilhos m^{-2} em função do número de graus dias (Soma) térmica na temperatura base de $16^{\circ}C$ das oito variedades.....	169
Figura 4.26 – Tempo térmico para emergência da cana soca (TTRATNEM) das oito variedades.....	170
Figura 4.27 – Regressão quadrática e linear entre o número da folha e área foliar de cada folha das variedades V1, V2, V3 e V4	174
Figura 4.28 – Regressão quadrática e linear entre o número da folha e área foliar de cada folha das variedades V5, V6, V7 e V8	175
Figura 4.29 – Regressão quadrática entre o número da folha e comprimento de cada folha das variedades V1, V2, V3 e V4.....	176
Figura 4.30 – Regressão quadrática entre o número da folha e comprimento de cada folha das variedades V5, V6, V7 e V8.....	177
Figura 4.31 – Regressão quadrática entre o número da folha e a largura máxima de cada folha das variedades V1, V2, V3 e V4	178
Figura 4.32 – Regressão quadrática entre o número da folha e a largura máxima de cada folha das variedades V5, V6, V7 e V8	179
Figura 4.33 – Soma dos quadrados do erro em função de diferentes temperaturas basais para o surgimento de folhas +1 das oito variedades.....	180
Figura 4.34 – Número de perfilhos m^{-2} estimados (linhas) e observados (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades	183
Figura 4.35 – Número total de folhas estimadas (linhas) e observadas (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades	185
Figura 4.36 – Número de folhas verdes (NFV) estimadas (linhas) e observadas (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades	187
Figura 4.37 – Altura de colmos (m) estimadas (linhas) e observadas (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades	189
Figura 4.38 – IAFv, Índice de Área foliar Verde ($m^2 m^{-2}$) estimados (linhas) e observados (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades..	191
Figura 4.39 – Massa fresca de colmos ($t ha^{-1}$) estimados (linhas) e observados (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades	193
Figura 4.40 – Massa seca de colmos ($t ha^{-1}$) estimados (linhas) e observados (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades	195

Figura 4.41 – Biomassa seca da parte aérea ($t\ ha^{-1}$) estimados (linhas) e observados (pontos) em condições de casa de vegetação para oito variedades	197
Figura 4.42 – Sacarose ($t\ ha^{-1}$) estimadas (linhas) e observadas (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades.....	199
Figura 4.43 – Teor de sacarose aparente da cana-de-açúcar (%POL da cana) em condições de casa de vegetação para as oito variedades.....	201
Figura 5.1 – Localização geográfica de cidade de Caçu-GO.....	209
Figura 5.2 – Variação da precipitação anual total entre 1985 a 2013 e a precipitação média da estação Sintética de Caçu – GO	212
Figura 5.3 – Variação da precipitação anual total entre 2012 e 2015 da estação meteorológica da Odebrecht Agroindustrial Unidade Rio Claro, Caçu – GO.....	213
Figura 5.4 – Evolução da produtividade de massa fresca de colmos em função das épocas de plantio/colheita e dos diferentes tipos solos em cultivo irrigado e sequeiro das variedades V1 e V2.....	220
Figura 5.5 – Evolução da produtividade de massa fresca de colmos em função das épocas de plantio/colheita e dos diferentes tipos solos em cultivo irrigado e sequeiro das variedades V3 e V4.....	221
Figura 5.6 – Evolução da produtividade de massa fresca de colmos em função das épocas de plantio/colheita e dos diferentes tipos solos em cultivo irrigado e sequeiro das variedades V5 e V6.....	222
Figura 5.7 – Evolução da produtividade de massa fresca de colmos em função das épocas de plantio/colheita e dos diferentes tipos solos em cultivo irrigado e sequeiro das variedades V7 e V8.....	223
Figura 5.8 – Gráfico box-plot da produtividade de massa fresca de colmos das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita sob cultivo sequeiro e irrigado no solo 1.....	224
Figura 5.9 – Gráfico box-plot da produtividade de massa fresca de colmos das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita sob cultivo sequeiro e irrigado no solo 2.....	225
Figura 5.10 – Gráfico box-plot da produtividade de massa fresca de colmos das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita sob cultivo sequeiro e irrigado no solo 3.....	226
Figura 5.11 – Gráfico box-plot da produtividade de sacarose das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita sob cultivo sequeiro e irrigado no solo 1.....	231

- Figura 5.12 – Gráfico box-plot da produtividade de sacarose das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita sob cultivo sequeiro e irrigado no solo 2232
- Figura 5.13 – Gráfico box-plot da produtividade de sacarose das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita sob cultivo sequeiro e irrigado no solo 3233

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros de ecótipos do modelo DSSAT/CANEGRO e suas respectivas descrições	57
Tabela 2.2 – Parâmetros de cultivares do modelo DSSAT/CANEGRO e suas respectivas descrições	58
Tabela 2.3 - Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO e suas respectivas descrições	59
Tabela 3.1 – Esquema de distribuição dos graus de liberdade (G.L.) para as fontes de variação (F.V.), de acordo com o delineamento experimental e o arranjo de distribuição dos tratamentos.....	75
Tabela 3.2 – Análise química do solo para macronutrientes em três diferentes camadas.....	78
Tabela 3.3 – Análise Química do solo para micronutrientes em três diferentes camadas.....	79
Tabela 3.4 – Caracterização físico-hídrica do solo.....	80
Tabela 3.5. Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten (1980).	80
Tabela 3.6 – Irrigação total acumulada (mm) por parcela nos tratamento L100, L75, L50 e L75* das oito variedades estudadas	93
Tabela 3.7 – Coeficientes que representam a relação entre a Massa seca de Folhas Verdes Totalmente Expandidas e Área Foliar destas mesmas folhas em função das quatro épocas de amostragem e das oito variedades.....	98
Tabela 3.8 – Resumo da Análise de Variância da Área Foliar Verde (AF_v) e Índice de Área Foliar Verde (IAF_v) com valores de F e sua significância nas quatro épocas de amostragem	100
Tabela 3.9 – Área Foliar Verde (AF_v) e Índice de Área Foliar Verde (IAF_v) e teste de médias das oito variedades, independente de lâmina, dentro de cada época de amostragem	101
Tabela 3.10 – Área Foliar Verde (AF_v) e Índice de Área Foliar Verde (IAF_v) e teste de médias das quatro lâminas, independente de variedade, dentro de cada época de amostragem	102
Tabela 3.11 – Área Foliar Verde (AF_v) e Índice de Área Foliar Verde (IAF_v) das oito variedades em função de cada lâmina dentro de cada época de amostragem	103

Tabela 3.12 – Resumo da Análise de Variância da Sacarose aparente da cana-de-açúcar com valores de F e sua significância nas três épocas de amostragem	111
Tabela 3.13 – Teores de sacarose aparente da cana-de-açúcar (% POL da CANA) e teste de médias: (A) das variedades dentro de cada época de amostragem, independentemente de lâmina e (B) lâminas dentro de cada época, independentemente de variedade	112
Tabela 3.14 – Resumo da Análise de Variância da Biomassa Fresca de Colmo de cana-de-açúcar com valores de F e sua significância nas quatro épocas de amostragem.....	113
Tabela 3.15 – Biomassa Fresca de Colmos (TCH, t ha ⁻¹) e teste de médias entre as variedades dentro de cada época de amostragem sem separação de lâminas	114
Tabela 3.16 – Biomassa Fresca de Colmos (TCH, t ha ⁻¹) e teste de médias entre as lâminas dentro de cada época de amostragem sem separação de variedades	114
Tabela 3.17 – Resumo da Análise de Variância da Biomassa seca da parte aérea com valores de F e sua significância nas quatro épocas de amostragem.....	117
Tabela 3.18 – Produtividade de biomassa seca da parte aérea (t ha ⁻¹) e teste de médias das lâminas dentro de cada época de amostragem, independentemente de variedade	118
Tabela 3.19 – Produtividade de biomassa seca da parte aérea (t ha ⁻¹) e teste de médias das variedades dentro de cada época de amostragem, independentemente de lâmina..	118
Tabela 3.20 – Resumo da Análise de Variância do Número de perfilhos m ⁻² com os valores de F e sua significância nas sete datas de avaliação.....	121
Tabela 3.21 – Número de perfilhos m ⁻² e teste de médias das lâminas em cada época de amostragem independente de variedades	122
Tabela 3.22 – Número de perfilhos m ⁻² e teste de médias das variedades em cada época de amostragem independente de lâminas	122
Tabela 3.23 – Número de Folhas secas em Função dos Dias após a Colheita (DAC) e das diferentes variedades submetidas ao tratamento L100 em diferentes dias após a colheita...	126
Tabela 3.24 – Resumo da Análise de Variância da Altura de Plantas de cana-de-açúcar com valores de F e sua significância nas sete datas de avaliação	127
Tabela 3.25 – Altura média de plantas das oito variedades, independente de lâmina nas sete datas de avaliação	128

Tabela 3.26 – Altura média de plantas na quatro lâminas, independente de variedade nas sete datas de avaliação	128
Tabela 3.27 – Resumo da Análise de Variância do Número, Comprimento e diâmetro com valores de F e sua significância.....	129
Tabela 3.28 – Número, comprimento e diâmetro de Entrenós e teste de médias das variedades independente de lâminas.....	130
Tabela 3.29 – Número, comprimento e diâmetro de Entrenós e teste de médias das lâminas independente de variedades.....	130
Tabela 4.1 – Análise química do solo para macronutrientes em três diferentes camadas.....	142
Tabela 4.2 – Análise Química do solo para micronutrientes em três diferentes camadas.....	142
Tabela 4.3 – Caracterização físico-hídrica do solo.....	143
Tabela 4.4. Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten (1980).	144
Tabela 4.5 – Filocrono geral (FILOgeral), filocrono até o ponto de “Broken Stick” (PI_1), filocrono das demais folhas restantes (PI_2) e o PSWITCH	163
Tabela 4.6 – Valores de filocrono (PI_1 e PI_2) das oito variedades em função de diferentes temperaturas basais	167
Tabela 4.7 – Valores de parâmetros de cultivares medidos e calibrados para as variedades V1, V2, V3 e V4 e da variedade padrão NCo376	171
Tabela 4.8 – Valores de parâmetros de cultivares medidos e calibrados para as variedades V5, V6, V7 e V8 e da variedade padrão NCo376	172
Tabela 4.9 – Valores de parâmetros de ecótipos medidos e das oito variedades e da variedade padrão NCo376	181
Tabela 4.10 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável número de perfilhos m^{-2} ..	182
Tabela 4.11 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável número total de folhas (NFT).....	184
Tabela 4.12 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável número de folhas verdes (NFV).....	186

Tabela 4.13 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável altura de colmos até a folha +1 (top visible dewlap).....	188
Tabela 4.14 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para índice de área foliar de folhas verdes (IAFv).....	190
Tabela 4.15 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável massa fresca de colmos.	192
Tabela 4.16 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável massa seca de colmos...	194
Tabela 4.17 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável biomassa seca da parte aérea.....	196
Tabela 4.18 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável massa seca de sacarose	198
Tabela 4.19 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável sacarose da massa fresca (%POL).....	200
Tabela 5.1 – Média dos dados meteorológicos da estação Sintética de Caçu – GO.....	211
Tabela 5.2 – Média dos dados meteorológicos da estação meteorológica da Odebrecht Agroindustrial Unidade Rio Claro	212
Tabela 5.3 – Caracterização físico-hídrica do solo 1 (Sertãozinho).....	214
Tabela 5.4 – Caracterização físico-hídrica do solo 2 e Solo 3	214
Tabela 5.5 – Resumo da Análise de Variância da produtividade de massa fresca de colmos com valores de F e sua significância das oito variedades.....	215
Tabela 5.6 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de massa fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) das oito variedades nos três diferentes solos independente de épocas de plantio/colheita e de cultivo irrigado/sequeiro	216
Tabela 5.7 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de massa fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) das oito variedades em cultivo irrigado e sequeiro independente do solo e das épocas de plantio/colheita	216

Tabela 5.8 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de massa fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita independente do solo e de cultivo irrigado/sequeiro	216
Tabela 5.9 – Teste Scott-Knott sobre a produtividade de massa fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) das variedades V1, V2, V3 e V4 em função dos três diferentes tipos de solo, épocas de plantio/colheita e irrigação	217
Tabela 5.10 – Produtividade média de massa fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) das variedades V5, V6, V7 e V8 em função dos três diferentes tipos de solo, épocas de plantio/colheita e irrigação.....	218
Tabela 5.11 – Resumo da Análise de Variância da produtividade de sacarose com valores de F e sua significância das oito variedades	227
Tabela 5.12 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de sacarose ($t\ ha^{-1}$) das oito variedades nos três diferentes solos independente de épocas de plantio/colheita e de cultivo irrigado/sequeiro.....	228
Tabela 5.13 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de massa fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) das oito variedades em cultivo irrigado e sequeiro independente do solo e das épocas de plantio/colheita.....	228
Tabela 5.14 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de massa fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita independente do solo e de cultivo irrigado/sequeiro	228
Tabela 5.15 – Produtividade média de sacarose ($t\ ha^{-1}$) das variedades V1, V2, V3 e V4 em função dos três diferentes tipos de solo, épocas de plantio/colheita e irrigação.....	229
Tabela 5.16 – Produtividade média de sacarose ($t\ ha^{-1}$) das variedades V5, V6, V7 e V8 em função dos três diferentes tipos de solo, épocas de plantio/colheita e irrigação.....	230

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países de maior destaque do setor sucroenergético, uma vez que detém a maior produção mundial de cana-de-açúcar e pouco mais de um terço da cana cultivada no mundo. O País produz aproximadamente 650 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano (safra 2013/2014) o que lhe confere a posição de maior Produtor Mundial de Açúcar, e segundo Produtor Mundial de Etanol (UNICA, 2015). A expansão da cana-de-açúcar aumenta a cada ano em área plantada, bem como em finalidades, como exemplo, a geração de energia elétrica e etanol de segunda geração a partir do bagaço e/ou palha.

O cultivo de cana-de-açúcar pode ser observado em diversas regiões brasileiras e a cada ciclo observa-se a expansão para áreas não tradicionais, muitas destas, porém, caracterizadas por períodos com déficit hídrico, com maior duração e intensidade que as regiões tradicionais. Segundo Marin et al., (2011) as novas áreas estão localizadas principalmente na região Central e Nordeste do país, frequentemente sujeitas a um risco produtivo mais elevado.

Por serem consideradas mais sujeitas a intempéries, a inserção da cultura nestas novas áreas de expansão deve ser embasada por algum tipo de suporte e o uso de modelos matemáticos de crescimento e desenvolvimento baseados em processos que simulem o comportamento da cana-de-açúcar pode ser uma alternativa. Estes modelos auxiliam na decisão do produtor quanto à escolha das melhores variedades e formas de manejo para reduzir os prejuízos devido a condições adversas de cultivo. De acordo com Marin et al., (2011) estes modelos podem contribuir no monitoramento e na previsão de produtividade, bem como auxiliar na compreensão dos mecanismos envolvidos nas respostas da cultura ao ambiente. Além disso, os modelos de simulação de crescimento da cana-de-açúcar permitem determinar os riscos envolvidos para as culturas em cada região agrícola auxiliando o planejamento de políticas públicas de seguros (GODOY, 2007).

Os modelos de crescimentos de culturas são uma sequência de equações matemáticas que representam os processos de crescimento que ocorrem na planta e as interações entre a planta e o meio ambiente. A modelagem é uma forma prática de incorporar os resultados da experimentação agrícola, compactando um amplo conjunto de informações, servindo assim, como um meio de entendimento, transmissão e padronização de tecnologia (BARROS, 2011).

Os principais programas de modelagem matemática aplicada à agricultura, não tem origem brasileira e seu uso no país requer ajustes. Nassif et al., (2012) diz que o modelo CANEGRO é uma boa ferramenta para a simulação do crescimento da cultura da cana-de-açúcar para as variedades brasileiras, quando adequadamente parametrizado. Os processos simulados, muitas vezes, têm de ser modificados para se adaptarem a modelos ambientais específicos, o que reforça a ideia de que não há modelo universal para uma cultura (MARIN, 2011; SINCLAR e SELIGMAN, 1996). Frente a isso verifica-se a necessidade de estudos que busquem obter os parâmetros para outras variedades brasileiras.

Considerando a importância da cultura no cenário agrícola brasileiro, a falta de informações sobre plantio em regiões de intenso déficit hídrico e a onerosidade para realização de pesquisas em campo, bem como o grande volume de material (variedades) disponível para os agricultores, objetiva-se com este trabalho:

- Caracterizar agronomicamente oito variedades de cana-de-açúcar;
- Mensurar parâmetros do modelo CANEGRO;
- Efetuar a calibração do modelo de Simulação de Crescimento CANEGRO/DSSAT para oito variedades de cana-de-açúcar sem restrição hídrica no solo;
- Simular o processo de fotossíntese e partição de fotoassimilados, de modo a estabelecer um processo de “Benchmarking” da produtividade limite destas oito variedades de cana-de-açúcar;
- Simular o crescimento e produtividade da cana-de-açúcar no ambiente de produção do Cluster Caçú – GO da Empresa Odebrecht Agroindustrial, Caçu – GO.

Referências

Barros, A. C. **Utilização do modelo CANEGRO para estimativa da produtividade de cana-de-açúcar irrigada em diferentes regiões do Brasil.** 2011. 118 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

GODOY, A.P. **Modelagem de processos de acumulação de biomassa e de açúcar da cana-de-açúcar via sistemas nebulosos.** 2007. 254 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

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 production systems. **Agronomy Journal**, v.103, p.100-110, 2011.

NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; PALLONE FILHO, W. J.; RESENDE, R. S.; PELLEGRINO, G. Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesq. Agrop. Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 311–318, 2012.

SINCLAIR , T. R.; SELIGMAN, N. G. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.5, p. 698-704, sep-oct. 1996.

UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar). **Maior produtor mundial de cana-de-açúcar**. Disponível em <<http://www.unica.com.br/faq/>> Acesso em 15 de fevereiro de 2015.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Origem e Expansão Geográfica da Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence à família Poaceae e gênero *Saccharum*. É uma planta do tipo C4, monocotiledônea, alógama, de ciclo semiperene e própria de climas tropicais e subtropicais (DANIELS; ROACH, 1987). De acordo com MOORE et al. (2014), a família Poaceae inclui aproximadamente 10.000 espécies classificadas em quase 700 gêneros entre estes o *Saccharum*.

O centro de origem foi amplamente debatido por diversos autores, mas ainda se mantém controverso e discutível. A região da Ásia é a mais citada como provável origem (RIPOLI et al., 2007) e relata-se, a Nova Guiné para *Saccharum officinarum* e *Saccharum robustum*, a China para a *Saccharum sinensis* e o norte da Índia para *Saccharum barberi* (DANIELS; ROACH, 1987). O cultivo de cana-de-açúcar no continente americano iniciou em virtude das expedições de Cristóvão Colombo por volta de 1493 (MACHADO, 2003) e no Brasil, as primeiras mudas foram trazidas por Martim Afonso, da Ilha da Madeira no ano de 1532. Os primeiros cultivos foram realizados na Vila São Vicente (hoje São Paulo) onde também foi construído o primeiro engenho de cana-de-açúcar, porém foi no Nordeste, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia, que os engenhos de açúcar se multiplicaram (MACHADO, 2003).

Ao longo de sua história a cadeia produtiva da cana-de-açúcar passou por vários períodos de transformação e, com a consolidação dos mercados externos e internos, a produção canavieira aos poucos foi se concentrando no estado de São Paulo, tornando-se o principal estado na produção de cana-de-açúcar, principalmente em áreas caracterizadas por boa disponibilidade hídrica. Porém o aumento da demanda por etanol a partir da década de 90, as constantes crises no setor de petróleo, o aquecimento global, a valorização do açúcar no mercado externo e a diminuição de áreas para expansão do cultivo nas regiões tradicionais em cana-de-açúcar do Estado de São Paulo, incitaram a busca por novas áreas de plantios (oeste e noroeste de SP, MS, MT, GO, MG, BA, TO, MA e PI), em regiões caracterizadas, em sua maioria, por uma deficiência hídrica anual acima de 400 mm, limite que torna inviável a produção e obtenção de rentabilidade com a cultura da cana sem irrigação (GARCIA, 2011)

2.2. Morfologia

A morfologia vegetal é um ramo da Botânica que se encarrega do estudo organográfico e anatômico das estruturas e formas das plantas (CAPELLARI JÚNIOR et al., 2004; DAMIÃO FILHO, 2005). Na cana-de-açúcar adulta têm-se como principais estruturas os colmos (principal e secundários), as raízes e as folhas.

2.2.1. Colmo

O colmo de cana-de-açúcar é definido como a porção acima do solo que sustenta as folhas e a inflorescência (SCARPARI e BEAUCLAUIR, 2008). Trata-se de um típico caule encontrado nas gramíneas, classificado como colmo cheio.

O colmo é basicamente formado pelo nó, região onde se fixa a bainha; a zona radicular que inclui uma gema e vários primórdios radiculares; anel de crescimento e o entrenó (CASAGRANDE, 1991), com uma disposição de repetidas subunidades. O colmo é considerado, economicamente, a principal parte da planta, uma vez que é desta porção que se extrai açúcar, etanol, e grande parte da fibra.

No ápice do colmo, observa-se a região meristemática, responsável pelas divisões celulares, formação da epiderme e feixes vasculares. Nesta região se dá o desenvolvimento da planta, com a formação do entrenó, nó, gemas, folhas e oportunamente a inflorescência. Ao longo dos estádios de desenvolvimento, em conjunto com as condições ambientais, observa-se o crescimento das estruturas formadas.

O colmo, além de fundamental como estrutura produtiva, também é importante para a reprodução da cana-de-açúcar. Tradicionalmente, o plantio é realizado através dos toletes, contendo gemas laterais, aptas a se desenvolverem assexuadamente e formar uma nova planta. Neste caso, o colmo é seccionado para quebrar a dominância apical exercida pelos hormônios auxina e citocinina e estimular a divisão e expansão celular. Rae et al. (2014) explica que a reprodução da cana também pode ser realizada via sexuada, com o plantio de sementes verdadeiras.

Anatomicamente, a estrutura caular da cana-de-açúcar apresenta características peculiares ao acúmulo de sacarose. Durante o desenvolvimento vegetativo, grande parte do carboidrato (sacarose e amido) produzido

fotossinteticamente é destinada a formação de hexoses e esqueletos de carbono requeridos para a divisão e alongamento celular (BELTRÃO, 2007; LEITE, 2013; ORI, 2006;). Este consumo de carboidratos é especialmente importante para a formação da região do entrenó, abundante em tecidos parenquimáticos, já que é nesta região que a sacarose será acumulada na maturidade. Quando se inicia o período de maturação dos colmos, os carboidratos, especialmente a sacarose, deixam de ser clivadas para a utilização na formação de novas células e passa a ser estocada (MESCHEDE, 2009). A quantidade de sacarose depende da quantidade de invertase ácida secretada do apoplasto do tecido parenquimático, sendo que variedades com o tecido parenquimático melhor desenvolvido tem maior capacidade de estoque em relação àquelas com tecido pouco desenvolvido (BOARETTO, 2012; RODRIGUES, 1995; WALSH et al. 2005). Estes autores ainda explicam que o bom suprimento de água no período de formação do colmo possibilita maior acúmulo de sacarose durante a maturação, já que a parede celular é formada ao redor da membrana plasmática da célula túrgida e que, mesmo que haja redução na disponibilidade de água durante a maturação, as células ainda podem se expandir, conferindo elasticidade ao tecido de estoque.

2.2.2. Sistema Radicular

O sistema radicular é responsável pela fixação da planta e absorção da solução nutritiva do solo. A cana-de-açúcar apresenta um sistema adventício e segundo Dillewijn (1952), com três tipos básicos: raízes superficiais, ramificadas e absorventes; raízes de fixação, mais profundas e raízes cordão, que podem atingir até seis metros de profundidade.

Em cana planta, as primeiras raízes formadas são as superficiais ou raízes temporárias, originadas a partir dos primórdios radiculares localizados na zona radicular dos toletes plantados. Para o bom desenvolvimento desta estrutura, é ideal o suprimento adequado de água (solo na capacidade de campo) e temperatura atmosférica entre 28 e 34°C (CASAGRANDE, 1991; VASCONCELOS e CASAGRANDE, 2008). De acordo com Vasconcelos e Casagrande (2008), a absorção de água pelos toletes ativa a mobilização de enzimas que controlam a divisão, diferenciação e crescimento das células que originam as raízes. Segundo

Logsdon et al., (1987); Walker (1969) e Box (1996), a temperatura do solo influencia na biomassa radicular, no grau de alongamento e ramificação.

As raízes superficiais suprem de água e nutrientes as plantas por aproximadamente 30 dias, é quando se dá início ao desenvolvimento das raízes dos perfilhos primários. Estas raízes são originadas a partir de divisões periclinais do meristema radicular das gemas dos toletes. O surgimento e desenvolvimento das raízes e do perfilho não é uma sequência de etapas simplória e única. Segundo Casagrande (1991), as raízes e o perfilho principal podem surgir e desenvolver de diferentes maneiras: O sistema radicular pode desenvolver-se antes do perfilho (Figura 2.1 A); O perfilho desenvolve-se antes do sistema radicular (Figura 2.1 B) ou ambos se desenvolvem ao mesmo tempo (Figura 2.1 C).

Figura 2.1 – Surgimento e desenvolvimento do perfilho e de raízes, Fonte: Casagrande (1991)

Com relação às soqueiras, ao contrário da cana planta, não existe o desenvolvimento de raízes temporárias. Ocorre neste caso uma renovação do sistema radicular influenciada pelo umedecimento do solo após a colheita e não pelo fato de ocorrer o corte por si só (CASAGRANDE, 1991). A época do corte (estiagem ou não) é responsável pela predominância de raízes vivas ou mortas. De acordo Casagrande (1991) quando o corte é realizado no período de estiagem há predominância de raízes mortas sobre as vivas, ocorrendo o inverso quando a colheita é realizada em períodos chuvosos. Segundo este mesmo autor, a presença de algumas raízes vivas no período de corte é importante para a sobrevivência do rebento na fase inicial de desenvolvimento já que os tecidos xilemáticos e floemáticos entre as raízes e os toletes com gemas são interligados. Vasconcelos e Casagrande (2008) informam que quando o corte é realizado em períodos úmidos

praticamente não há morte de raízes e que as raízes novas são formadas a partir das raízes velhas.

As raízes da cana-de-açúcar, seja em cana planta, ou soca, estão 85% concentradas até 60 cm de profundidade no solo, estas apresentam regiões tenras e em constante divisão celular sendo que as raízes da soqueira são mais superficiais que as da cana planta, pois as gemas dos toletes são mais superficiais e quanto maior o número de cortes, mais superficial se torna o sistema radicular (FARONI, 2004; LEE, 1926).

2.2.3. Folha

A folha é o órgão responsável pelo processo fotossintético e pela interação da planta com a atmosfera. De acordo com Vasconcelos e Casagrande (2008) as folhas têm o papel de trocar gases e vapor d'água com o meio ambiente através do movimento estomático e em função da turgidez das células-guarda.

As folhas da cana-de-açúcar são unitárias, alternas, opostas e encontram-se fixadas aos nós dos colmos pela bainha. São basicamente divididas em duas partes, a lâmina foliar, plana, lanceolada e a bainha que envolve o colmo, parte inferior da folha (MOORE, 1987; RAE et al. 2014; SCARPARI e BEAUCLAIR, 2008). A lâmina foliar é uma estrutura alongada, linear e estreita, anfiestomática, suportada por uma grossa nervura central e nervuras finas paralelinérveas; o comprimento da lâmina foliar, na fase adulta varia de 0,5 a 1,5 m e a largura varia de 0,025 m e 0,1 m, dependendo da variedade (MOORE, 1987; RAE et al. 2014; SCARPARI e BEAUCLAIR, 2008).

As folhas são originadas a partir de divisões periclinais do ápice da região meristemática, governada pelo acúmulo térmico, ao longo do tempo (STRECK, 2010). Segundo Singels et al., (2008) e Inman-Bamber (1994) o tempo, em graus-dia, decorrido entre a aparência de duas folhas sucessivas é denominado de filocrono. Em cana-de-açúcar o filocrono pode ser determinado pela observação do aparecimento de duas folhas completamente expandidas (ROBERTSON et al., 1998) ou pelo surgimento de duas folhas ainda não expandidas, número total de folhas (BONNET, 1998; CAMPBELL, 1998). Dillewijn (1952) afirma que a dependência da temperatura para emissão de novas folhas em cana é um atributo

peculiar, e que a temperatura mínima requerida varia entre variedades, porém discrimina que temperaturas inferiores a 10,8°C é limitante.

A contagem e a identificação das folhas expandidas e não expandidas são realizadas através da utilização do sistema “Kuijper”, Figura 2.2, descrito por van Dillewijn (1952). De acordo com este mesmo autor as folhas são numeradas do topo para a base. Neste sistema, a mais recente folha completamente expandida é identificada pela visibilidade da aurícula (top visible dewlap) e designada folha +1; as demais são numeradas sequencialmente de modo que as mais velhas têm números mais elevados (2, 3, 4 etc.), e as folhas mais jovens reduzem a numeração para 0, -1, -2 e assim por diante (DILLEWIJN, 1952; RAE et al., 2014; SCARPARI e BEAUCLAIR, 2008).

Figura 2.2 – Detalhes da identificação foliar do “sistema Kuijper”; Fonte: www.sugarcane crops.com

O desenvolvimento, crescimento e a manutenção da área foliar são fundamentais para a ótima captação e utilização da radiação e, conseqüentemente, dão suporte para que planta tenha rendimento potencial, em conjunto com os fatores bióticos e abióticos não limitantes (BONNET, 1998). De acordo com Sinclair et al. (2004) o bom desenvolvimento da área foliar é fundamental na produção de culturas para maximizar a interceptação da radiação solar e acumulação de biomassa de culturas.

A interceptação da radiação pelas folhas e sua conversão em energia química durante a fotossíntese está diretamente relacionada com o rendimento da cana-de-açúcar já que a sacarose, commodity econômica, juntamente com o bagaço e palha são consequências da produção de hexoses e carboidratos (TERUEL et al. 1997). Os produtos da fotossíntese, juntamente com os ciclos de incorporação de carbono e energia (ciclo de Krebs e respiração celular mitocondrial) atuam como precursores da membrana plasmática, parede celular e substâncias lipídicas (cera, cutina, suberina), constituintes do tecido parenquimático de armazenamento, fibras e estruturas de revestimento, que configuram e/ou possibilitam o acúmulo de açúcar e a deposição de biomassa da Cana. Apesar de a atividade fotossintética ser precursora da síntese de tecidos e fibra, cada variedade tem o seu potencial determinado geneticamente, assim como os fatores edafoclimáticos interferem nesta atividade (MESCHÉDE, 2009). De todo modo, presume-se que quanto mais desenvolvido o dossel, maiores as chances de obtenção de rendimento econômico.

Outro fator que interfere na absorção de radiação é a arquitetura da copa, característica varietal. Smith e Singels (2006) relataram que variedades com folhas que tendem ao paralelismo em relação ao solo tendem a sombrear as folhas mais velhas do colmo, reduzindo a atividade fotossintética das folhas mais velhas, fortes fontes de hexoses requeridas pelas regiões de crescimento. Já as variedades com copa eretófila que pouco sombreiam as demais folhas tendem a maior utilização da radiação fotossinteticamente ativa.

O lento desenvolvimento da copa do dossel pode ser crítico e um fator limitante a produção final de cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER, 1994). Segundo Camargo (2007) o desenvolvimento estrutural pode ser caracterizado pelo parâmetro biofísico denominado Índice de Área Foliar (IAF).

Pereira e Machado (1986) explicam que a radiação solar é atenuada ao penetrar o dossel vegetativo em função da área foliar acumulada verticalmente no topo da cultura. Resultados experimentais apresentados por estes autores evidenciam que tal atenuação é, em geral, exponencial. Devido ao sombreamento, as folhas inferiores recebem menor quantidade de radiação, havendo redução em sua taxa de fotossíntese e variação da taxa na copa foliar como um todo. Por esse motivo, é importante calcular o IAF ao longo dos estádios de uma cultura, correlacionadas com o potencial de atividade fotossintética. Para compensar a redução na disponibilidade de luz nas folhas mais velhas, Pereira e Machado (1986)

ainda afirmam que a cultura aumenta sua área foliar até atingir um máximo. Após esse ponto, há contínua renovação de folhas, sendo as mais velhas substituídas por novas, mais eficientes.

Em modelos de crescimento da cana-de-açúcar, o IAF calculado através da área foliar e a área do solo (WATSON, 1947) é um importante fator de ajuste para o rendimento (DOOREMBOS e KASSAN 1979; O'LEARY 2000). De acordo com Bassham apud Sandhu (2012) o IAF é fundamental para a estimativa do rendimento das culturas, sendo que a cana-de-açúcar tem alto IAF e alta eficiência fotossintética, quando cultivada em pleno sol. De acordo com Scarpari (2007) o IAF depende da variedade, do estágio de desenvolvimento e o ideal é que se encontre entre cinco e sete durante o período vegetativo, abundante em folhas verdes.

Na Figura 2.3 encontra-se um resumo das partes constituintes, colmo folha e raízes.

Figura 2.3 – Morfologia do colmo (A, B) e touceira (C) da cana-de-açúcar. (A), o colmo compreende uma série de nós separados por internós com gemas em lados alternados. (B), a folha pode ser dividida em a lâmina (b) com a nervura central (m) e a bainha (s). A aurícula (a), barbelas (d), e lígula (l) são também usados como características de diagnóstico. (C), Perfilhos secundários e terciários surgem a partir de gemas laterais na parte subterrânea de colmo original. Adaptado de Rae et al. (2014) e SugarcaneCrops.

2.2.4. Ciclo e Fases de Cultivo

A cana-de-açúcar interage de forma intensa com o ambiente onde está inserida, modulando o seu desempenho com as variações externas, conforme o seu estágio de desenvolvimento. A disponibilidade térmica, hídrica e intensidade luminosa são determinantes para o estabelecimento, desenvolvimento, crescimento

e acúmulo de sacarose nos colmos, assim como a escassez ou excesso dos fatores citados alteram o acúmulo de biomassa e açúcares redutores (glicose e frutose).

A avaliação das fases fenológicas de uma cultura auxilia na determinação dos fatores bióticos e abióticos que interferem na obtenção da máxima produtividade agrônômica e é fundamental para o estabelecimento das técnicas de manejo. Segundo Bonnet (2014), os tratos culturais são realizados em função do estágio em que se encontra a cultura e o conhecimento detalhado da duração e momento de mudança de um estágio a outro é o primeiro elemento para compreensão das respostas vegetais ao meio ambiente.

Em um conceito generalizado, os ciclos das culturas são divididos em três grandes estágios: a embriogênese, o desenvolvimento vegetativo e o desenvolvimento reprodutivo (BONNET, 2014). Para a Cana-de-açúcar, muitas são as classificações do seu ciclo de vida. Alguns autores consideram todo o ciclo botânico, enquanto outros descrevem apenas o ciclo de cultivo comercial.

Bonnet (2014) em seu recente livro sobre a Fisiologia da Cana descreve o ciclo da cultura de forma detalhada, considerando dez fases fenológicas: brotação ou germinação e emergência, perfilhamento, desenvolvimento foliar, desenvolvimento do colmo, crescimento do colmo (momento apto para a colheita), emissão da inflorescência, florescimento, frutificação, formação e maturação das sementes e senescência.

Doorenbos e Kassam (1979) define três estágios aplicáveis em plantios comerciais: estabelecimento e período vegetativo, agregação da produção e maturação. Santos et al. (2009), também considera três fases no ciclo de cana-planta: 1ª fase – intenso perfilhamento; 2ª fase – grande crescimento em altura, estabilização do IAF e intenso acúmulo de material orgânico; e 3ª fase – maturação dos colmos.

Outros autores, como Gascho e Shih (1983) e Câmara (1993), dividem este ciclo nas seguintes fases fenológicas: brotação e emergência (formação do colmo primário), estabelecimento e perfilhamento (fase que se inicia após a emergência dos brotos e perdura até o final do perfilhamento), crescimento dos colmos (fase que se inicia após o término do intenso perfilhamento até o início do acúmulo de sacarose) e maturação dos colmos (intenso acúmulo de sacarose nos entrenós) (Figura 2.4). Esta é a descrição mais frequentemente adotada como base de manejo para a cultura e o ciclo desejado em plantios comerciais. No modelo de Cana-de-

açúcar CANEGRO, as fases envolvidas são Germinação e Emergência, Perfilhamento, crescimento de colmo e senescência (SINGELS et al., 2008), classificação muito próxima ao proposto por Gascho e Shih (1983), porém as fases são distinguidas pelo acúmulo de tempo térmico e uma fase pode sobrepor outra.

Singels et al. (2008) explica que a cultivar NCo376, referência do modelo, requer 428°Cd (cana planta) e 203°Cd (cana soca) para completar a fase de germinação. A fase de perfilhamento inicia-se após o surgimento do perfilho principal e vai até a ocorrência do pico populacional. A fase de crescimento do colmo inicia-se quando há um determinado acúmulo de tempo térmico, a contar da emergência do perfilho primário e perdura até a colheita, enquanto a fase de senescência, ocorre continuamente desde o pico populacional até a colheita.

Figura 2.4 - Ilustração das fases de brotação e emergência, perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação dos colmos para cana-de-açúcar. Adaptado de Gascho e Shih ,1983

Em relação a classificação de Gascho e Shih (1983), diversas considerações são feitas em cada estágio. Quanto à inserção da cultura no campo, sabe-se que a Cana-de-açúcar pode ser propagada vegetativamente por meio da brotação das gemas do colmo ou através de semente verdadeiras, obtidas por cruzamento. Tradicionalmente o plantio é realizado com toletes seccionados, contendo gemas aptas a brotação por garantir uniformidade do dossel e características varietais conhecidas. Segato et al., (2006) citam que a capacidade de brotação, enraizamento e emergência da Cana, com foco nos fatores intrínsecos, é uma característica

genética, no entanto, dentro de uma mesma variedade, a brotação varia de acordo com a idade do colmo seccionado, concentração de açúcares, nutrientes minerais e umidade do tolete. Os teores de açúcares redutores (glicose e frutose), umidade e minerais, na planta em pé, diminuem do ápice para a base do colmo, enquanto o teor de sacarose aumenta no sentido contrário. Segundo os autores, nota-se que a velocidade de emergência das gemas está positivamente correlacionada com os teores de glicose, frutose, água e minerais e negativamente com o teor de sacarose concentrada nos colmos.

Em relação à brotação de gemas remanescentes de touceiras colhidas, sabe-se que ocorre de forma mais rápida em comparação com a inserção do cultivo porque logo após a quebra da dominância apical, as gemas que permanecem na touceira já estão ligadas a um sistema radicular bem desenvolvido e capaz de suprir as necessidades hídricas e nutricionais, além de estarem localizadas de forma superficial e o desenvolvimento foliar encontra menor enfrentamento físico.

De 20 a 30 dias após o início da brotação, observa-se a emergência do perfilho primário na superfície do solo. Simultaneamente observa-se a ramificação radicular e formação da touceira, com pico três a cinco meses após o plantio, sob condições edafoclimáticas favoráveis. Conforme o crescimento radicular, a absorção de água e nutrientes do solo torna-se mais intensa e os tecidos aéreos tornam-se fotossintetizantes, apesar de ainda haver dependência das reservas do tolete.

O broto recém-emergido ou colmo primário contém uma sucessão de nós e entrenós muito próximos e continuará o seu crescimento em altura assumido pela gema apical.

Há uma grande relação entre a produtividade da Cana com a brotação dos toletes, perfilhamento e formação das touceiras, já que o rendimento depende do suficiente estabelecimento.

Bonnet (2014) afirma que perfilhos são produzidos em excesso até a colheita e disputa, durante esse período por luminosidade, água e nutrientes. A fase de intenso perfilhamento ocorre quando atingem o máximo da produção de novos perfilhos, chegando algumas variedades a produzir mais de vinte perfilhos por touceira. A partir do ponto máximo de perfilhamento, a competição pelos fatores de crescimento (luz, água, espaço e nutrientes) torna-se elevada, de forma que se constata a redução do perfilhamento através da diminuição e paralização desse processo, além de morte dos perfilhos mais jovens.

Os perfilhos que sobrevivem a fase de grande competição terão o crescimento acelerado, com a formação de colmos industrializáveis. O crescimento da parte aérea da Cana ocorre concomitante ao crescimento do colmo, quando se observa a expansão dos tecidos de reserva, fibras, feixes vasculares e folhas. Um entrenó inicia a sua expansão quando a folha a ele acoplada já está totalmente expandida, atuando como fonte das requisições metabólicas para o crescimento (DILLEWIJN, 1952).

A fase de intenso crescimento desenvolve os tecidos de translocação (xilema e floema) e de reserva, o parênquima do entrenó. É nesta região que a sacarose será estocada após a completa estruturação tecidular e as enzimas envolvidas na síntese e clivagem da sacarose são reordenadas ao acúmulo, ao invés do consumo.

A fase de maturação é influenciada por uma variedade de fatores internos e externos à planta. Os fatores internos são aqueles relativos ao carregamento e descarregamento do floema, atividade das enzimas Sacarose Fosfato Sintase (SPS), Sacarose Sintase (Susy) e Invertases (Ácida vacuolar, Ácida de parede e Neutra), e capacidade de estoque no tecido parenquimático (BOARETTO, 2012). Os fatores externos que favorecem a maturação são aqueles que desfavorecem o crescimento vegetativo, a citar a reduzida disponibilidade hídrica, térmica e de radiação solar.

O ciclo produtivo da Cana-de-açúcar tem duração média de cinco a sete anos com quatro a seis cortes. Em termos regionais, o Brasil apresenta dois períodos distintos de safra: Na região Norte-Nordeste, a colheita é realizada de setembro a março e no Centro-Sul de abril a novembro. Desta maneira, o país produz bioetanol e açúcar de forma escalonada durante o ano todo, sendo esta produção influenciada tanto pela produtividade como pela qualidade de cana-de-açúcar (CGEE, 2009).

2.3. Fatores Ambientais

2.3.1. Radiação Solar

A radiação solar incidente sobre a superfície terrestre é composta por duas frações, basicamente: A radiação solar direta e a radiação solar difusa. A radiação

direta é a parcela da energia radiante que chega diretamente na superfície do solo, e a radiação difusa é a outra parcela de energia proveniente das demais direções que, em dias de céu limpo, corresponde a apenas 15% do total da radiação que chega à superfície terrestre (TURCO e RIZZATTI, 2006). Da radiação que atinge o topo da atmosfera (radiação extraterrestre), 25% é considerada direta e 26% difusa (TERAMOTO, 2003), dissociada pela ação das nuvens e partículas diversas na atmosfera.

Ao ser interceptada pelo dossel, a radiação solar pode ser absorvida, transmitida e refletida em proporções variáveis, dependendo do ângulo de incidência dos raios solares e das características estruturais das plantas. Tais características estão intimamente relacionadas com a disposição espacial das folhas, ângulo de inserção foliar, índice de área foliar e propriedades óticas da vegetação (MACHADO et al., 1985).

Ainda conforme Machado et al., (1985) a composição espectral da radiação é modificada ao ser interceptada pela comunidade vegetal, visto que as folhas apresentam características seletivas quanto ao comprimento de onda incidente. Em geral, a fração fotossinteticamente ativa (PAR) da radiação solar é menos refletida e mais absorvida pela vegetação que a fração do infravermelho próximo (NIR), acarretando enriquecimento da fração PAR disponível à cultura. As interações da radiação solar com as plantas e solo condicionam o microclima interno da cobertura vegetal, a quantidade e a qualidade da radiação disponível dentro do dossel.

Pereira et al., (2002) salienta que a radiação solar é o principal elemento meteorológico, pois é através deste que todos os elementos associados ao clima são desencadeados, como a temperatura, umidade atmosférica, vento, pluviosidade entre outros. Além de estar diretamente associada aos fatores climáticos, a radiação solar tem estreita relação com a produção agrícola, já que é a fonte propulsora da atividade fotossintética, produção de fitomassa, e atua como um dos agentes reguladores do movimento estomático, trocas gasosas, atividade enzimática e consequentemente, com a regulação metabólica vegetal (FERRAZ, 1987).

A cana-de-açúcar, por se tratar de uma cultura tipo C4, requer altas intensidades luminosas para obtenção da ótima atividade fotossintética. Segundo Gouvêa (2008), em condições com elevadas taxas de radiação, os colmos são mais grossos e curtos, as folhas mais longas e verdes e o perfilhamento mais intenso. Em

condições de baixa irradiância, os colmos são mais finos e longos e as folhas são mais estreitas e com coloração tende a ser amarelada (RODRIGUES, 1995).

A determinação da radiação solar é indispensável para modelagem de crescimento e avaliações de eficiência de sua energia retida na fitomassa (MONTEITH, 1977).

2.3.2. Temperatura do ar

A temperatura é um dos fatores mais importantes na produção da cana-de-açúcar, uma vez que influencia já no processo de germinação/brotação (MARIN 2014). Para cada estágio fenológico existem temperaturas mínimas, máximas e ótimas. De acordo com Marin (20__) a temperatura ótima para o desenvolvimento da cana-de-açúcar está entre 20°C e 30°C. Rodrigues (1995) indica que em temperaturas abaixo de 20°C o crescimento da cultura é praticamente nulo, similarmente quando há temperaturas acima de 38°C. Este mesmo autor cita como temperaturas ideais a faixa entre 25° e 35°C e relata que esta faixa pode variar conforme a variedade.

De acordo com Bonnett (2014), a temperatura exerce um importante papel nas culturas, uma vez que pode ativar / desativar e acelerar / inibir atividade metabólica e atividade de enzimas, por exemplo.

Plantas com metabolismo do tipo C4 apresentam taxa de fotossíntese máxima ao redor de 30-35°C, decrescendo rapidamente abaixo de 20°C. A taxa de fotossíntese é nula abaixo de 12°C, aumenta linearmente até atingir 30°C, e permanece constante entre 30 e 35°C (PEREIRA e MACHADO, 1986). Estes autores ainda afirmam que a taxa de respiração aumenta exponencialmente com a temperatura. Estes dados corroboram com os apresentados por Gouvêa (2008) que relata que a temperatura está diretamente associada com a produção de biomassa e consequentemente com o crescimento e formação dos desejáveis tecidos de estoque da sacarose. Este autor ainda afirma que períodos com temperaturas acima de 25°C e disponibilidade hídrica favorecem as fases iniciais de desenvolvimento da cultura e que, logo após a maturidade fisiológica, a redução na temperatura (entre 10 a 20° C) e restrição hídrica estimula o enriquecimento em sacarose.

Frente aos fatores apresentados, a correlação entre a temperatura ambiente e os parâmetros dos modelos agrônômicos para a Cana-de-açúcar não haveria de

ser diferente. De acordo com Beauclair (1994) os modelos que não levam em consideração os elementos climatológicos, poderão, no máximo representar uma fração da produtividade.

De acordo com Villa Nova et al. (1972) apud Scarpari (2002) o método de contagem dos graus-dias é a melhor forma para correlacionar o desenvolvimento do vegetais e temperatura. Seguindo o mesmo direcionamento, Brunini et al. (1976), descreveram que o uso das unidades térmicas ou graus-dia é uma das melhores maneiras de relacionar a temperatura do ar com o desenvolvimento e crescimento vegetal. A utilização deste método otimizou a previsão e a descrição dos eventos fenológicos comparados com métodos anteriormente usados, a citar o número de dias e época do ano (MCMASTER e WILHELM, 1997). A mensuração dos graus-dias baseia-se no somatório dos valores de temperatura superiores e temperatura base, considera a temperatura crítica para o desenvolvimento vegetativo (Camargo et al., 1987).

2.4. Fatores edáficos

Dentre os vários complexos fatores que influenciam na produção agrícola, o solo destaca-se pelo seu papel de fornecer suporte físico e solução rica em água e nutrientes. Desta maneira, o conhecimento de suas características é importante para julgar o potencial do ambiente de produção (LEPSCH, 1987). De acordo com Koffler e Donzeli (1987) o conhecimento da capacidade produtiva do solo é um dos principais fatores que condicionam o sucesso do empreendimento agrícola. A cana-de-açúcar, por se tratar de uma cultura implantada em praticamente todos os estados brasileiros, está sendo adaptada sobre os mais diferentes tipos de solos, o que torna a caracterização edáfica ainda mais essencial (KOFFLER e DONZELI, 1987).

Gouvêa (2008) descreve que a cana-de-açúcar pode ser produzida sob diversas condições edáficas. Em termos de relevo, os terrenos devem ser regulares, com declividade suave (entre 2 e 5%), com boa drenagem. Quanto a disponibilidade de água, o este mesmo autor retrata que no Brasil é incomum a utilização de irrigação suplementar e a disponibilidade hídrica é regida pela pluviosidade e pelo potencial de armazenamento do solo, condicionado por sua capacidade de retenção e drenagem. Em relação a compactação do solo, o autor supracitado afirma que em

solos compactados há uma redução significativa na porosidade, restringindo a disponibilidade de água à cultura, além de dificultar a penetração e crescimento radicular.

A fertilidade do solo também interfere no estabelecimento de desempenho da cana, pois a deficiência ou excesso de nutrientes ocasionam distúrbios morfológicos. Para Ortolani Filho (1983) a ausência de nitrogênio, fósforo, potássio, magnésio e enxofre, entre outros elementos minerais, pode ocasionar a má formação dos perfilhos, diminuição da atividade fotossintética e diminuição da sacarose. Os teores adequados destes nutrientes favorecem o desempenho produtivo, assim como elevados teores de matéria orgânica (SILVA, CABEDA E CARVALHO, 2006)

A cana-de-açúcar não necessita de um tipo especial de solo para se desenvolver e é bastante adaptável a solos de texturas variadas. Os solos mais recomendados são aqueles com mais de um metro de profundidade para que haja bom crescimento radicular, preferencialmente bem arejados (GOUVÊA, 2008). Já é de conhecimento generalizado que a cana requer maior disponibilidade hídrica durante o intenso crescimento vegetativo e reduzida disponibilidade durante a maturação, o suficiente para restringir o crescimento vegetativo.

Em solos são realizadas, basicamente, quatro tipos de caracterização: a morfológica dos perfis, a química (pH, bases trocáveis, nutrientes, saturação por bases e alumínio), a física (granulometria) e a físico-hídrica que envolve porosidade total, macro e microporosidade e curvas de retenção.

Geralmente modelos aplicáveis a cana-de-açúcar requerem uma quantidade considerável de informações sobre o horizonte ou camadas do solo (GIJSMAN et al., 2007). Gijsman et al., (2002) mencionam como dados de entrada os parâmetros da curva de retenção tais como umidade na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente e saturação. Em relação ao modelo DSSAT/CANEGRO, além dos citados anteriormente, são também considerados dados de entrada o teor de argila, silte, o teor de rocha, teor de carbono, pH em água, capacidade de troca catiônica e teor total de nitrogênio.

2.5. Irrigação e Relações Hídricas de cana-de-açúcar

O crescente aumento da demanda por biocombustíveis e a importância da cana-de-açúcar neste setor vêm exigindo tecnologias que proporcionam melhores

produtividades e produtos. Dentre vários avanços tecnológicos, a irrigação é uma das técnicas que mais vem proporcionando melhorias no setor agrícola. Segundo Dalri (2006), a prática de irrigação é considerada um instrumento tão importante quanto à aplicação de fertilizantes, controle de plantas invasoras, pragas e doenças para o aumento da produtividade e da rentabilidade agrícola. Esta importância vai além das regiões com fortes índices de deficiência hídrica, pois de acordo com Taiz e Zeiger (2009), o déficit hídrico não é limitado apenas às regiões áridas e semiáridas, pois mesmo em regiões consideradas climaticamente úmidas, ocorrem períodos em que a distribuição irregular das chuvas limita o crescimento das plantas.

A finalidade básica da irrigação é proporcionar o suprimento de água às culturas de maneira a atender às necessidades hídricas no momento adequado, possibilitando altas produtividades e produtos de boa qualidade (BERNARDO, 2006; PIRES et al., 2014). Scardua e Rosenfeld (1987) destacam que o consumo de água da cana-de-açúcar varia em função do ciclo da cultura (cana planta ou soca), do estágio de desenvolvimento (fase fenológica), das condições climáticas, da disponibilidade de água no solo e da variedade cultivada. A necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia em torno de 1500 a 2500 mm por ciclo (DOORENBOS; KASSAM, 1979), sendo o estágio de crescimento dos colmos o que demanda maior volume de água.

Para a cultura da cana-de-açúcar, a irrigação geralmente é considerada de três maneiras (FREITAS et al., 2009):

- Irrigação de salvação: visa o uso da água apenas por um período curto ou estágio de cultivo, consiste em aplicar lâmina de 40 a 80 mm após cada corte anual, com intuito de “salvar” a soca ou o plantio;
- Irrigação com déficit controlado: Consiste em aplicar lâminas acumuladas de 200 a 300 mm ano⁻¹, com déficit em fases de menor sensibilidade ao estresse hídrico;
- Irrigação plena: o objetivo é aumentar a produtividade da lavoura, aplicando lâminas acumuladas que podem superar os 450 mm ano⁻¹.

A prática da irrigação plena na cana-de-açúcar ainda vem sendo pouco adotada. Sua utilização está restrita, principalmente, às áreas que apresentam déficit

hídrico elevado, onde irrigação por déficit não é suficiente, garantido altos índices de produção e produtividade. Nas áreas de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento, a irrigação plena é muitas vezes adotada pela impossibilidade de movimentar o equipamento para irrigar outras áreas.

Coelho et. al (2012), em experimento com 24 variedades em casa de vegetação, irrigadas com 100 e 75 % de reposição da Evapotranspiração da cultura via gotejamento, obtiveram uma produtividade média de 173,0 t ha⁻¹ para a cana-de-açúcar irrigada plenamente (100 %) e 132,9 t ha⁻¹ para a cana irrigada com déficit hídrico (75 %).

Além da relevância do cultivo irrigado da cana-de-açúcar no aumento da produtividade e do número de cortes por plantio (vida útil do canavial) que visam o aumento do lucro do produtor, existem os benefícios socioeconômicos indiretos, tais como o aumento do número de empregos na região, os quais somente serão duradouros se os cultivos irrigados tiverem sustentabilidade econômica, social e ambiental (BERNARDO, 2006).

A água tem papel fundamental nos processos fotossintéticos, fotoquímicos e bioquímicos, responsáveis pela manutenção metabólica do organismo vegetal, turgescência, translocação e na pressão de crescimento e turgor. A deficiência hídrica no solo pode prejudicar ou impedir a produção de energia, paralisando os mecanismos de ação vegetal, e isso depende da intensidade e da duração do período de deficiência (CASAGRANDE e VASCONCELOS, 2008).

Conforme a fase fenológica, o déficit hídrico pode ter maior ou menor impacto na produtividade agrícola (RAMESH, 2000; PIMENTEL, 2004; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Rosenfeld (1989) estudou o período crítico de deficiência hídrica para cana-planta em diversas fases de crescimento e diferentes épocas do ano. O autor induziu a deficiência hídrica com auxílio de abrigos de plásticos instalados no campo e concluiu que todas as fases da cultura apresentaram redução do crescimento em função do déficit aplicado.

De acordo com Pimentel (2004) a disponibilidade hídrica restritiva no solo afeta negativamente o crescimento dos cultivos agrícolas e é a principal causa da redução da produtividade, sendo que para cana-de-açúcar o início do desenvolvimento da cana-planta é o período mais sensível ao déficit hídrico (ROSENFELD, 1989). Por outro lado, quando o estresse hídrico ocorre durante a

fase de maturação, observa-se aumento da concentração de sacarose nos colmos (INMAN-BAMBER, 2004).

2.6. Modelagem na agricultura

A modelagem matemática consiste no uso de equações ou conjuntos destas que representam o comportamento de um sistema (OTENG-DARKO et al., 2013). Muniz et al. (2007) define a modelagem como uma organização de atributos de interesse particular, que visa conceituar, integrar e generalizar o conhecimento científico por meio da simplificação da condição real. De maneira geral a modelagem é o processo no qual são utilizados modelos para simular ou descrever um comportamento ou desempenho, por exemplo.

Wallach (2006) define modelos de culturas como um modelo matemático que descreve o crescimento e o desenvolvimento de uma cultura interagindo com o solo. De acordo com Oteng-Darko et al. (2013), o modelo simula ou imita o comportamento de uma cultura prevendo o crescimento dos seus componentes (p.e. folhas, raízes, caules e grãos). Este mesmo autor relata que os modelos não apenas preveem rendimento final ou o estado final de produção, mas também envolve muitas informações dos processos que envolvem o crescimento e o desenvolvimento das culturas. Marin et al. (2014) resume modelo como uma caracterização de um sistema real, que pode ser representado com um simples desenho do sistema analisado, ou ainda como um complexo conjunto de equações.

Wallach (2006) considera os modelos sobre dois pontos de vista, que apesar de diferentes são complementares. Primeiro o autor define o modelo de cultura como um sistema de equações diferenciais que é um modelo dinâmico (**dynamic system model**), o segundo é definido como um conjunto de equações para respostas de interesse em função de variáveis explicativas (**response model**). De acordo com Wallach (2006), os modelos envolvem basicamente três elementos: variáveis de estado, variáveis explicativas e parâmetros. As variáveis estado são as variáveis a ser estudada dentro do sistema, por exemplo, índice de área foliar e biomassa da parte aérea. As variáveis explicativas são variáveis que afetam diretamente o comportamento/resposta das variáveis estado, por exemplo, a radiação é considerada uma variável explicativa quando se estuda a biomassa de

plantas. Os parâmetros são considerados valores constantes ou com pequena variação independentemente da situação de interesse.

Segundo Thornley e Johnson (2000) dentre vários tipos de modelos, os empíricos e mecanísticos são considerados os principais. De acordo com Paustian et al. (1992) apud Muniz et al. (2007) os modelos podem ser de três tipos: (i) empíricos, baseados em dados puramente observados; (ii) estocásticos, em que o processo é descrito pelas leis de probabilidade e (iii) mecanísticos, que consideram as leis físicas, químicas e biológicas no processo. Addiscott (1993) divide os modelos em: (i) determinísticos, em que um conjunto de eventos leva a um resultado único e definido e (ii) estocásticos, em que a incerteza é considerada na sua estrutura. Essas duas categorias mencionadas podem ainda dividir os modelos de simulação em: (i) mecanísticos, que procuram descrever os mecanismos envolvidos no processo e (ii) funcionais, que descrevem apenas os aspectos gerais do processo. A utilização da modelagem baseada em processos na agricultura teve início com o trabalho de De Wit (1965) que introduziu a teoria de sistemas e as técnicas de simulação na dinâmica dos sistemas agrícolas. Modelos de simulação de crescimento de culturas baseados em processos são considerados por Nassif (2015) como ferramentas de elevado potencial para compreensão da interação solo-planta-atmosfera bem dos processos físicos, químicos e biológicos.

A modelagem agrícola baseada em processos apresenta diversas aplicações, descritas por Lisson et al., (2005) a) avaliação do impacto do plantio e da colheita sobre a produtividade da cana-de-açúcar, em que os dados podem ser analisados para tomada da melhor decisão sobre melhor época de plantio e colheita; b) constituição de dados de benchmarking dos limites de produção, potenciais e atingíveis, em que o conhecimento dos limites de produção permite o estudo da produtividade potencial em diferentes regiões; c) melhoria da eficiência do uso da água; d) previsão de produtividade.

De maneira geral a tentativa de elaboração de um modelo matemático-fisiológico oferece uma série de vantagens, dentre elas: (a) informações a respeito de diferentes processos fisiológicos que podem ser reunidas em um único modelo; (b) um modelo agrupa grande quantidade de informações; (c) o embasamento matemático para as hipóteses adotadas permite compreender quantitativamente a natureza das interações ambiente-planta; (d) a modelagem estimula novas ideias;

(e) a elaboração de um modelo ajuda a detectar áreas onde o conhecimento é limitado; (f) modelos permitem interpolações e previsões (THORNLEY, 1976).

Os modelos permitem a previsão do desempenho de situações já ocorridas ou ainda não experimentadas pela utilização da simulação, como por exemplo, o estudo dos possíveis impactos das mudanças climáticas na produtividade, desta maneira considera-se uma ferramenta de grande utilidade para o planejamento de médio e longo prazo, pois permitem avaliar várias condições de produção agrícola em diversos ambientes (BARROS, 2011; MARIN et al., 2011; MARIN et al., 2013b; NASSIF et al. 2012; SUGUITANI, 2006). Suguitani (2006) relata ainda que com a utilização de modelos de simulação é possível prever eventuais quebras de produtividade, verificar o potencial produtivo de variedades para diferentes regiões, ou então auxiliar pesquisadores e produtores no manejo cultural, além de diminuir gastos com experimentação. Segundo este mesmo autor a previsão de produções tem efeitos sobre a política agrícola, os processos de comercialização, formação de estoque, dentre outros aspectos.

Barros (2011) trata os modelos de crescimento como uma forma prática de incorporar resultados da experimentação agrícola, compactando um amplo conjunto de informações, servindo assim, como um meio de transmissão e padronização de tecnologia.

As simulações realizadas pelos modelos são feitas através da configuração dos diversos cenários, sendo estes idealizados a partir de uma seleção pragmática dos diversos atributos provenientes das diferentes áreas do conhecimento, de tal forma que se possa compreender como esses atributos escolhidos venham a relacionar-se entre si, dentro de limites pré-definidos pelo modelador (DOURADO NETO et al., 1998).

2.7. Modelagem em cana-de-açúcar

Os primeiros passos da modelagem em cana-de-açúcar são datados na década de 70, relatados em três países: Bull e Tovey (1974) iniciaram na Austrália gerando posteriormente o APSIM – Sugarcane e o QCANE (LIU; BULL, 2001); Thompson (1976) desenvolveu na África do Sul um modelo precursor do atual modelo CANEGRO/DSSAT (INMAN-BAMBER, 1991) e no Brasil, Ometto (1974) deu o primeiro passo até o SIMCANA (PEREIRA; MACHADO, 1986).

Segundo O'Leary (2000) dois modelos mecanísticos vem sendo mais utilizados para simulações em cana-de-açúcar sendo eles o APSIM E CANEGRO. Marin (2014) reforça ao afirmar que existem vários modelos de crescimento de plantas para cana-de-açúcar, mas apenas dois (APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO) estão efetivamente disponíveis para usuários finais. Marin et al. (2013a) em estudo sobre os princípios de funcionamento dos modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO concluíram que ambos são capazes de simular com eficiência a fenologia da cultura, o índice de área foliar e a produtividade da cultura, entretanto, eles tendem a subestimar a absorção de radiação pelo dossel da cultura.

No Brasil, a utilização de modelos de crescimento ainda é pequena frente a alguns países, entretanto alguns autores (MARIN et al., 2011; NASSIF et al., 2012; COSTA et al., 2014; VIANNA e SENTELHAS, 2014; MARIN e JONES, 2014), citados por Nassif (2015) vem intensificando pesquisas nesta área buscando melhor compreender não só os modelos bem como a cultura de cana-de-açúcar.

2.7.1.CANEGRO

O modelo de simulação para cana-de-açúcar DSSAT/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991) foi incorporado em 1997 na versão 3.1. Desde então, vários grupos vêm desenvolvendo pesquisas suplementares.

O desenvolvimento do modelo CANEGRO tinha como principal motivo modelar os processos fisiológicos mais relevantes para a indústria de açúcar Sul-Africana de uma forma mecanicista e para estabelecer uma base para a inclusão de outros processos que poderiam tornar-se importante para a indústria (INMAN-BAMBER, 2000). Este mesmo autor relata que uma das primeiras questões era determinar a idade da colheita no período ótimo, por conta de pragas que atacavam os colmos de alto teor de açúcares, na África do Sul nos anos de 1970.

As principais características do modelo DSSAT/CANEGRO foram descritas por Singels et al. (2008): a emergência do perfilhamento primário é simulada quando determinado número de graus dias foi acumulado a partir do plantio ou do corte, o início do crescimento de colmos é simulado quando um período específico de exigência térmica é atingido a partir do perfilhamento primário. O pico de perfilhamento ocorre após um acúmulo de temperatura após a emergência. Na modelagem, a fase de perfilhamento dura desde a emergência dos primeiros

perfilhos até o máximo perfilhamento, enquanto o crescimento dos colmos ocorre desde o início do crescimento até a colheita dos colmos. A fase de senescência de perfilhos é modelada após o pico de perfilhamento até a colheita. Este tipo de modelo, por basear-se na modelagem de processos, além de permitir a estimativa da produtividade, também permite conhecer como se deu o desenvolvimento da cultura ao longo do ciclo de cultivo, pois considera variáveis biométricas, aspectos envolvendo o consumo de balanço de água e ciclagem de alguns nutrientes, principalmente o nitrogênio (JONES et al., 2007). O modelo requer como dados de entrada, parâmetros de solo (capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e profundidade do solo) e também parâmetros meteorológicos (radiação solar, temperatura do ar: máximas e mínimas e precipitação). (SINGELS et al., 2008).

Esses conjuntos de parâmetros são subdivididos em três tipos: ecótipos com 31 parâmetros (Tabela 2.1), 20 parâmetros de cultivares (Tabela 2.2) e 23 de espécie (Tabela 2.3), porém os parâmetros de espécie não recomendam ser ajustados pelo usuário do modelo (SINGELS et al., 2008).

Tabela 2.1 - Parâmetros de ecótipos do modelo DSSAT/CANEGRO e suas respectivas descrições

(Continua)

Parâmetros	Unidade	Descrição
DELTTMAX	t ⁻¹	Variação máxima do teor de sacarose por unidade de variação da massa do colmo na seção imatura do caule
SWDF2AMP		Sensibilidade de particionamento da sacarose ao estresse hídrico
CS_CNREDUC		Redução máxima da fração do dossel devido ao estresse hídrico
CS_CNPERIOD	dias	Período de estresse hídrico requerido para ter o maior efeito na redução do dossel
Tthalfa	GD.m ⁻¹	Graus-dia necessário para o dossel ajustar-se à metade da largura da linha
dPERdT	mm.h ⁻¹ °C ⁻¹	Mudança na taxa de crescimento da planta por unidade de temperatura efetiva
EXTCFN		Máximo Coeficiente de extinção de radiação do dossel
EXTCFST		Mínimo Coeficiente de extinção de radiação do dossel
LFNMEXT	n° folhas	Número de folhas (incluindo folhas mortas ainda fixadas) onde ocorre a máxima extinção da radiação
AREAMX_CF(1)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar ($y=cf1+cf2*x+cf3*x^2$)
AREAMX_CF(2)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar
AREAMX_CF(3)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar

Tabela 2.1 Parâmetros de ecótipos do modelo DSSAT/CANEGRO e suas respectivas descrições
(Conclusão)

WIDCOR		Parâmetro que influencia a largura das folhas
WMAX_CF(1)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
WMAX_CF(2)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
WMAX_CF(3)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
LMAX_CF(1)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
LMAX_CF(2)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
LMAX_CF(3)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
MAXLFLENGTH	Cm	Máximo comprimento absoluto de folha
MAXLFWIDTH	Cm	Máxima largura absoluta de folha
POPCF(1)		Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPCF(2)		Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPDECAY		Fração de perfilhos sobre a população madura (com 1600 °Cd), que senescem por unidade de graus dia
TTBASEEM	°C	Temperatura base para emergência e início do alongamento do colmo
TTBASELFEX	°C	Temperatura base para fenologia de folha
TTBASEPOP		Temperatura base para fenologia de colmos
TBASEPER		Temperatura base para extensão da planta
LG_AMRANGE		Variação na massa da parte aérea do início ao final do acamamento
LG_GP_REDUC		Redução na fotossíntese bruta devido ao acamamento total, como fração
LG_FI_REDUC		Redução na fração de interceptação do dossel devido ao acamamento completo

Informações extraídas de (SINGELS et al., 2008) e Nassif (2010)

Tabela 2.2 – Parâmetros de cultivares do modelo DSSAT/CANEGRO e suas respectivas descrições
(Continua)

Parâmetros	Unidade	Descrição
PARCEmax	g MJ ⁻¹	Máxima eficiência na conversão de radiação expressa em assimilados produzidos antes da respiração, por unidade de PAR
APFMX	t.t ⁻¹	Fração máxima de incremento de massa seca que pode ser atribuído a massa seca da parte aérea
STKPFMAX	t t ⁻¹ base massa seca	Fração do incremento diário de massa seca aérea particionada para o colmo em altas temperaturas em uma cultura madura
SUCA	t t ⁻¹	Parâmetro de particionamento de sacarose: máxima sacarose contida na base do colmo
TBFT	°C	Particionamento de sacarose: temperatura em que o particionamento de incremento de massa de colmo sem estresse para sacarose é 50% do valor máximo

Tabela 2.2 Parâmetros de cultivares do modelo DSSAT/CANEGRO e suas respectivas descrições
(Conclusão)

Tthalf	GD	Graus-dia para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento
Tbase	GD	Temperatura base para o desenvolvimento do dossel
LFMAX	n° folhas	Número máximo de folhas verdes saudáveis, plantas adequadamente irrigadas serão velhas o suficiente para perderem folhas após este número.
MXLFAREA	cm ²	Área foliar máxima atribuída a todas as folhas sobre o número de folhas MXLFARNO (cm ²)
MXLFARNO	n° folhas	Número de folhas sobre o qual é limitado pelo MXLFAREA
PI1	GD	Intervalo de filocrono um (para número de folhas abaixo do Pswitch)
PI2	GD	Intervalo de filocrono dois (para número de folhas acima do Pswitch)
PSWITCH		Número da folha em que há mudança no filocrono
MAX_POP	colmos m ⁻²	População de perfilhos máxima
POPTT16	colmos m ⁻²	População de colmos após 1600 graus-dia
TTPLNTEM	GD	Graus-dia para emergência da cana-planta
TTRATNEM	GD	Graus-dia para emergência da soqueira
CHUIBASE	GD	Graus-dia para o início do crescimento do colmo
TT_POPGROWTH	GD	Graus-dia para ocorrer o pico do perfilhamento
LG_AMBASE	t ha ⁻¹	Massa da parte aérea (colmo, folhas e água) onde ocorre o início do acamamento

Informações extraídas de (SINGELS et al., 2008) e Nassif (2010)

Tabela 2.3 - Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO e suas respectivas descrições
(Continua)

Parâmetros	Unidade	Descrição
Tbasephotos	°C	Temperatura base para fotossíntese
Critsw	GD	Limiar de estresse hídrico para impacto prolongado de estresse na fotossíntese
HuRecover		Graus-dia requerido para total recuperação da fotossíntese após estresse hídrico severo
RespQ10		Aumento da fração na taxa de respiração por 10°C de aumento na temperatura (coeficiente Q10)
RespGcf		Fração da fotossíntese bruta perdida na respiração para o crescimento
PCB		Coefficiente de partição: coeficiente de extinção da fração de incremento de massa seca, alocada para a biomassa acima do solo
Max_rootpf		Fração da partição máxima do incremento da massa diária às raízes
FTCON		Resposta à temperatura do parâmetro de forma
SURCON		Parâmetro de particionamento de sacarose que determina o tempo de resposta de mudanças na partição entre sacarose e fibra devido a mudanças ambientais
RTcmpg	cm.g ⁻¹	Comprimento radicular por massa de raiz
Wrk		Coefficiente de densidade de comprimento radicular por profundidade
RLVmin	cm.cm ⁻³	Densidade de comprimento radicular mínimo nas camadas do solo
SenesF	n° folhas	Número de folhas senescentes por broto por 100 dias de estresse
Reset	Mm	Chuva requerida para recompor o contador de dias de estresse
Percoeff		Fração do crescimento da planta atribuído ao alongamento do colmo

Tabela 2.3 Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO e suas respectivas descrições
(Conclusão)

CHTCoeff	cm.cm ⁻¹	Coeficiente de determinação da altura do dossel em função da altura do colmo e número de folhas
Hillpar1		Função empírica do parâmetro de forma
EORATIO		Relação da evapotranspiração de um dossel completamente formado e sem restrições hídricas de cana-de-açúcar comparado com a evapotranspiração de referência da grama (Kc da FAO-56)
RWUEP1		Taxa limite de suprimento de água no solo/evaporação potencial, abaixo da qual a evaporação e fotossíntese são limitadas
RWUEP2		Taxa limite de suprimento de água no solo/evaporação potencial, abaixo da qual o crescimento é limitado
RWUMX	cm ³ água	Absorção máxima de água por unidade de comprimento da raiz
LG_RATING	cm ⁻¹ raiz	Pontuação de acamamento quando a cultura está totalmente acamada
LG_CRIT_WIND	Km dia ⁻¹	Limite do vento para o acamamento

Informações extraídas de Singels et al. (2008) e Nassif (2010)

O modelo CANEGRO/DSSAT vem sendo tratado como uma ferramenta de bom desempenho, especialmente após o ajuste dos parâmetros para as condições brasileiras (MARIN et al., 2009; MARIN et al., 2011; NASSIF et al. 2012). Estes mesmos autores indicam que apesar do modelo possuir bom desempenho em diferentes condições do mundo ele requer validação para as diferentes variedades nas diversas condições climáticas e edáficas encontradas no Brasil.

Referências

ADDISCOTT, T.M. Simulation modelling and soil behaviour. **Geoderma**, Amsterdam, v.60, n.1/4, p. 15-40, dec. 1993.

BARROS, A.C. **Utilização do modelo CANEGRO para estimativa da produtividade de cana-de-açúcar irrigada em diferentes regiões do Brasil**. 2011. 118p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011.

BEAUCLAIR, E.G.F. **Produtividade da cana-de-açúcar em função de alguns macronutrientes presentes no caldo e no solo**. 1994. 98p. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

BELTRÃO, N.E.M. **Biossíntese e Degradação de Lipídios, Carboidratos e Proteínas em Oleaginosas**. Campina Grande-PB: EMBRAPA ALGODÃO 2007. 61p. (Documentos, 178).

BERNARDO, S. **Manejo da irrigação na cana-de-açúcar**. 2006. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cana_irrigada_producao_000fizvd3t102wyiv802hvm3jlwle6b8.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2015.

BOARETTO, L.F. **Análise do transcrito e proteoma do colmo de cana-de-açúcar relacionada ao metabolismo da sacarose**. 2012. 177p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

BONNETT, G.D. 1998. Rate of leaf appearance in sugarcane, including a comparison of a range of varieties. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 25, n. 7, p. 829–834, dec. 1998.

BONNETT, G.D. Developmental stages (phenology). In: MOORE, P.H.; BOTHA, F.C. (Ed.). **Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology**. New Delhi: John Wiley, 2014, chap. 3, p. 35-53.

BOX, J.E. Modern methods of root investigations. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, V. **Plant roots: the hidden half**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1996. chap. 10, p. 193-237.

BRUNINI, O.; LISBÃO, R.S.; BERNARDI, J.B.; FORNASIER, J.B.; PEDRO JÚNIOR, M.J. Temperatura-base para alface cultivar "White Boston", em um sistema de unidades térmicas. **Bragantia**, Campinas, v.35, n.19, p. 213-219, 1976

BULL, T.; TOVEY, D.A. Aspects of modelling sugarcane growth by computer simulation. In: INTERNATIONAL SOCIETY SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15., 1974, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: Sugar Journal, 1974. p. 1021–1032.

CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: _____. **Produção de cana de açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. p.31-64.

CAMARGO, F.F.; ADAMI, M.; BREUNIG, F.M.; MANTELLI, L.R.; COSTA, M.C. da; PONZONI, F.J.; FREITAS, J.G. de. Avaliação de Índices de Vegetação e de Índice de Área Foliar na caracterização espectral de dosséis de trigo (*Triticum aestivum*, L. - IAC-370). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, Brasil. **Anais ...** Florianópolis: INPE, p. 103-110.

CAMARGO, M.B.P. de; BRUNINI, O.; MIRANDA, M.A.C. de. Temperatura-base para cálculo dos graus dia para cultivares de soja em São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 2, p. 115-121, 1987.

CAMPBELL, J.A.; ROBERTSON, M.J.; GROF, C.P.L. Temperature effects on node appearance in sugarcane. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 25, n.7, p. 815-818, dec. 1998.

CAPELLARI JÚNIOR, L.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M.C.; CASTRO, P.R.C.; PERES, L.E.P.; APEZZATO-DA-GLORIA, B.; OLIVEIRA, R.F. de; RODRIGUES, R.R.; KLUGE, R.A. **Botânica Geral: gestão ambiental**. Piracicaba: ESALQ/USP/LCB, 2004.187p.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 1991. 157p.

CASAGRANDE, A. A.; VASCONCELOS, A.C.M de; Fisiologia da parte aérea. In: Dinardo-Miranda, L.L.; Vasconcellos, A.C.M. de; Landell, M.G.A. (Org.). **Cana-de-açúcar**. Campinas/SP: Instituto Agrônômico, 2008. chap. 3, 57-78p.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol combustível**: uma oportunidade para o Brasil. Brasília, 2009. 536p.

COELHO, R.D. ; MASCHIO, R.; LEAL, D.P.V. ; BARBOSA, F.S.; MAURI, R. Water Productivity into Biomass and Energy for 24 Brazilian Sugarcane Varieties Under Drip Irrigation. In: ASABE 2012 - Annual International Meeting, 2012, Dallas. **Anais...** St. Joseph: ASABE, 2012. v. 1.1 CD-RON.

COSTA, L.G.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P.; PINTO, H.M.; LOPES-ASSAD, M.L. Simulação do efeito combinado de palhada e adubação na modelagem da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 469-474, 2014.

DALRI, A.B. Irrigação em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Ceres, 2006. p. 157-170.

DAMIÃO FILHO, C.F. **Morfologia Vegetal**. 2.ed. Jaboticabal, SP: Fundação de Apoio a Pesquisa, Ensino e Extensão - FUNEP, 2005. 172p.

DANIELS, J.; ROACH, B.T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, D.J. (Ed.). **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier, 1987, cap. 2, p. 7-84.

DANTAS, A.A.A.; CARVALHO, L.G. de; CASTRO NETO, P. **Radiação solar**. Lavras, MG: UFLA, [20--]. Disponível em <
http://www.deg.ufla.br/site/_adm/upload/file/Agrometeorologia/5%20-%20RADIACAO%20SOLAR.pdf> Acesso em: 08 ago. 2015

DE WIT, C.T. **Photosynthesis of leaf canopies**. Wageningen: Pudoc, 1965. 57p. (Agricultural Research Report, 663).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 197p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOURADO NETO, D.; TERUEL, D.A. REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.55, n. especial, p.46 - 50, 1998.

FARONI, C.E. **Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 68p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) –

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004.

FERRAZ, E.C. Ecofisiologia do Arroz. In: CASTRO, P.R.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. Ecofisiologia da produção agrícola. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa Potassa e do Fosfato, 1987. p. 185-202.

FREITAS, R. G. de; BAFFA, D.C.F; BRASIL, R.P.C. do. Aumento na produtividade da cana-de-açúcar através da irrigação. **Nucleus**, Ituverava, Edição Especial, 15-30, 2009.

GARCIA, A. Avaliação de variáveis climáticas relacionadas ao cultivo da cana-de-açúcar na região de Ituverava – SP. **Nucleus**, Ituverava, v.8, n.2, 77-84, out. 2011.

GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. Sugarcane. In: TEARE, I.D.; PEET, M.M (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GIJSMAN, A. J.; THORNTON, P.K., HOOGENBOOM, G.; Using the WISE database to parameterize soil inputs for crop simulation models. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 56, n. 2, 85-100. 2007

GIJSMAN, A.J.; HOOGENBOOM, G.; PARTON, W.J.; KERRIDGE, P.C.; Modifying DSSAT for low-input agricultural systems, using a soil organic matter-residue module from CENTURY. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n 3, 462-474, 2002

GOUVÊA, J.R.F. **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP**. 2008. 98p. Dissertação (Mestrado Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant and Soil**, London, v.8, n.2, p.93–99, Feb. 1991.

INMAN-BAMBER, N.G. History of the CANEGRO model. In: INTERNATIONAL CANEGRO WORKSHOP, 1., 2000, Mount Edgecombe, **Proceedings...** Mount Edgecombe, South Africa, 2000, p.5-8

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

INMAN-BAMBER, N.G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p. 41-51, 1994.

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

JONES, M.; PORTER, C.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; SINGELS, A.; SHINE, J.; NAYAMUTH, R.; KINGSTON, G.; CHINORUMBA, S.; VAN DEN BERG, M.

Incorporating the DSSAT/CANEGRO sugarcane model into the DSSAT V4 crop modelling system. In: ISSCT CONGRESSES., 26, 2007. Durban. **Proceedings...** Durban : ISSCT, 2007.p.483-443

KOFFLER, N.F.; DONZELI, P.L. Avaliação dos solos brasileiros para a cultura da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 19-41.

LEE, H.A. The distribution of the roots of sugarcane in the soil in the Hawaiian Islands. **Plant Physiology**, Rockville, v.1, n.4, p.363-378, Oct 1926

LEITE, D.C.C. **Modificações da parede celular durante a formação de aerênquima em raízes de cana-de-açúcar**. 2013. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências. São Paulo, 2013.

LEPSCH, I.F. Influência dos fatores edáficos na produção. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed.) **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 83-98.

LISSON, S.N.; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 321-335, 2005.

LIU, D.L.; BULL, T.A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 144, n.2/3, p. 181–211, Oct. 2001.

LOGSDON, S.D.; RENEAU JR., R.B.; PARKER, J.C. Corn seedling root growth as influenced by soil physical properties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 221-224, mar.- apr. 1987.

MACHADO, F.B.P. **Brasil, a doce terra: História do Setor**. 2003. 8p. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/historia_da_cana_000fhc62u4b02wyiv80efhb2attuk4ec.pdf> . Acesso em: 21 abril 2016.

MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; CAMARGO, M.B.P.; FAHL, J.I. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 44, n. 1, p. 229-238, 1985.

MARIN, F.R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos**. 2014. 262p. Livre Docência - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MARIN, F.R. **Relação entre cultura e clima**. [20__]. Brasília: Embrapa. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_10_711200516716.html> Acesso em: 20 out. 2015.

MARIN, F.R.; JONES, J.W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, p. 1-17, 2014.

MARIN, F.R.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, Dordrecht, v.26, n.1, p.49-63, mar. 2014.

MARIN, F.R.; THORNBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; REZENDE, R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. Evaluation of APSIM-SUGAR and DSSAT-CANEGRO for a widely grown Brazilian sugarcane cultivar. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 28., 2013.São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2013a.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E.D.; PELLEGRINO, G.Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, London, v.117, n.1, p. 227-239, 2013b.

MARIN, F.R.; SUGUITANI, C.; DONZELLI, J.L.; PALLONE, W.J.; NASSIF, D.S. P.; SAKAI, R.H.; POLZER, D.L.; VIANA, M.S. Avaliação do modelo CANEGRO/DSSAT para quatro cultivares de cana-de-açúcar. 2009. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Viçosa, MG: UFV; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.

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 production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v.103, p.100-110, 2011.

MCMMASTER, G.S.; WILHELM, W.W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 87, n.4, p.291–300, dec. 1997.

MESCHEDE, D.K. **Efeito do glyphosate e sulfometuron-metil na fisiologia da cana-de-açúcar**. 2009. 76p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Julio De Mesquita Filho”, Faculdade De Ciências Agronômicas, Botucatu, 2009.

MONTEITH, J.L. Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, London, v. 281, n. 980, p. 277-294, nov. 1977.

MOORE, P.H. Anatomy and Morphology. In: HEINZ, D.J. **Sugarcane Improvement through Breeding**. Amsterdam: Elsevier, 1987, chap. 3, p. 85-142

MOORE, P.H.; PATERSON, A.H.; TEW, T. Sugarcane: The Crop, the Plant, and Domestication. In: MOORE, P.H.; BOTHA, F.C. (Ed.). **Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology**. New Delhi: John Wiley, 2014, cap. 1, p. 1-17.

MUNIZ, L.C.; VIU, M.A. de O.; MAGNABOSCO, C. de U.; LOPES, D.T. Modelagem e simulação na agropecuária. **PUBVET**, Maringá, v. 1, n. 11, p.1-31, dez. 2007.

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

NASSIF, D.S.P. **Evapotranspiração, transpiração e trocas gasosas em canavial irrigado**. 2015. 123p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE FILHO, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 311–318, 2012.

O’LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, n.2, p. 97-111, oct. 2000.

OMETTO, J.C. **Uma equação para estimativa de evapotranspiração potencial: sua aplicação no cálculo das necessidades hídricas e do rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar na região de Piracicaba- SP**. 1974. 129p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1974.

ORI, S.S. **Influência das auxinas no desenvolvimento e no teor de carboidratos solúveis, amido e proteína total solúvel em Phalaenopsis amabilis (Lineu) Blume (Orchidaceae) cultivada in vitro**. 2006. 133p Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente) – Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 2006

ORTOLANI FILHO, J. **Nutrição e adubação de cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e Alcool/PLANALSUCAR, 1983. 389p.

OTENG-DARKO, P.; YEBOAH, S.; ADDY, S.N.T.; AMPONSAH, S.; DANQUAH, E. O.; Crop modeling: A tool for agricultural research – A Review. **E Journal of Agricultural Research and Development**, Milpitas, v. 3, n. 1, p.1-6, 2013

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba – RS: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. Um simulador dinâmico do crescimento de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n.1, p. 107-122, 1986.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: Edur, 2004. 191p.

PIRES, R.C.M.; BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E.; SILVA, T.J.A. da Effects of Subsurface Drip Irrigation and Different Planting Arrangements on the Yields and Technological Quality of Sugarcane. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. Reston, v. 140, n. 9, Não paginado, 2014.

RAE, A.L.; MARTINELLI, A.P.; DORNELAS, M.C. Anatomy and Morphology. In: MOORE, P.H.; BOTHA, F.C. (Ed.). **Sugarcane**: physiology, biochemistry, and functional biology. New Delhi: John Wiley, 2014. chap. 2, p. 19-34.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 185, p. 249-258, 2000.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar**: estado da arte. 2.ed. Piracicaba: T.C.C. Ripoli, 2007. 198p.

ROBERTSON, M.J.; BONNETT, G.D.; HUGHES, R.M.; MUCHOW, R.C.; CAMPBELL, J.A. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v.25, n. 7, p. 819-828, dec. 1998.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 99 p. Disponível em: <<http://www.malavolta.com.br/pdf/1071.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2015.

ROSENFELD, U. **Determinação do período crítico de deficiência hídrica para a cultura da cana-de-açúcar (Saccharum spp.)**. 1989. 88p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

SANDHU, H.S.; GILBERT, R.A.; MCCRAY, J.M.; PERDOMO, R.; EILAND, B.; POWELL, G.; MONTES, G. Relationships among Leaf Area Index, Visual Growth Rating, and Sugarcane Yield. **Journal American Society of Sugar Cane Technologists**, Baton Rouge, v.32, p.1-14, 2012

SANTOS, V.R. dos; MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A.W. de; COSTA, J.P. V. da; SANTOS, C.G. dos; SANTOS, A.C. I. dos. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.13, n.4, p.389–396, 2009.

SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: [n.s.], 2006. 415p

SCARDUA, R.; ROSENFELD, U. Irrigação da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B.. **Cana-de-açúcar**: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 373-431.

SCARPARI, M.S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos**. 2002. 79p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SCARPARI, M.S. **PREDPOL**: Um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado. 2007. 120p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, EG.F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELLOS, A.C. M. DE; LANDELL, M.G.A. (Org.). **Cana-de-açúcar**. Campinas/SP: Instituto Agrônomo, 2008, cap. 2, p. 47-56.

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.; CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, cidade, v. 10, n. 3, p. 579-585, 2006.

SMITH, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, n. 2/3, p. 91-97, aug-sep. 2006.

SINCLAIR, T.R.; GILBERT, R.A.; PERDOMO, R.E.; SHINE JÚNIOR, J.M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, n. 2/3, p. 171-178, aug. 2004.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. **DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module**: scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling, South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

STRECK, N.A.; HANAUER, J. A.; GABRIEL, L. F., BUSKE, T. C.; LANGNER, J. A. Leaf development and growth of selected sugarcane clones in a subtropical environment. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.45, n.10, p.1049-1057, out. 2010

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosicas**. 2006. 60 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TERAMOTO, E.R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) baseados em parâmetros do solo e do clima**. 2003. 86 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

TERUEL, D.A.; BARBIERI, V.; FERRARO JR., L.A.. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 54, n. spe, p. 39-44, jun. 1997.

THOMPSON, G.D. Water use by sugarcane. **The South African Sugar Journal**, Durban, v. 60, n. 11, p. 592-600, 1976.

THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology**: a quantitative approach to problems in plant and crop hysiology. London: Academic Press, 1976. 318p.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling** – A mathematical approach to plant and crop physiology. 1 ed. New Jersey: The Blackburn Press, 2000. 669 p.

TURCO, J.E.P.; RIZZATTI, G.S. Avaliação de modelo matemático para estimar a radiação solar incidente sobre superfícies com diferentes exposições e declividades. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal – SP, v.26, n.1, p. 257-267, jan-abr. 2006.

VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica Co., 1952. 371p

VASCONCELLOS, A. C. M. de; CASAGRANDE, A. A. Fisiologia do sistema radicular In: Dinardo-Miranda , L. L.; Vasconcellos, A. C. M. de; Landell, M. G. A. (Org.). **Cana-de-açúcar**. Campinas/SP: Instituto Agrônômico, 2008, cap. 4, p. 79-97.

VIANNA, M.S.; SENTELHAS, P.C. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 237-246, 2014.

WALKER, J. M. One-degree increments in soil temperatures affect maize seedling behavior. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 33, p. 729-7363, sep.-oct. 1969.

WALLACH, D.; The two forms of crop models. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models**: evaluation, analysis, parameterization and applications. Amsterdam: Elsevier, 2006. chap. 1, p.03-10.

WALSH, K.B.; SKY, R.C.; BROW, S.M. The anatomy of the pathway of sucrose unloading within the sugarcane stalk. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 32, n. 4, p. 367-374, apr. 2005.

WATSON, D. J. Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. **Annals of Botany**, Oxford, v. 11, n. 1, p. 41-76, jan.1947.

3 CARACTERÍSTICAS BIOMÉTRICAS, PRODUTIVIDADE DE MASSA FRESCA E SACAROSE DE OITO VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB QUATRO NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO

Resumo

Com a utilização crescente de modelos de simulação de crescimento em cana-de-açúcar, a necessidade de fornecer informações para a parametrização tornou-se necessária, haja visto a grande diversidade de variedades brasileiras e a importância de dados biométricos e de produtividade para a fundamentação da modelagem matemática. Objetivou-se com este trabalho determinar a área foliar, índice de área foliar, teor de sacarose, altura de planta, e biomassa fresca e seca de colmos em oito variedades em função de quatro níveis de irrigação para quatro épocas de amostragem ao longo do primeiro ciclo de cana soca. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, pertencente à área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' (ESALQ/USP) localizada em Piracicaba – SP. O experimento foi delineado com três fontes de variação (FV): quatro épocas de amostragem, quatro lâminas de irrigação e oito variedades de cana-de-açúcar. As amostragens (épocas) foram realizadas trimestralmente, sendo a primeira, aproximadamente 100 dias após o início do experimento. As lâminas avaliadas (L50, L75, L100 e L75*) constituíram na reposição de frações da ETc tomando como referência o tratamento L100, em que se manteve a umidade do solo próximo capacidade de campo (θ_{cc}) em todo o experimento, sendo que cada variedade tinha sua própria referência L100. Em todas as variáveis analisadas o déficit hídrico, em uma ou mais épocas de amostragem, provocou redução. A produtividade de massa fresca de colmo é influenciada pela lâmina de irrigação já na segunda época de amostragem (~205 DAC), neste ponto há redução de 35% entre L100 e L50.

Palavras Chave: Biometria, Déficit hídrico, Modelagem

Abstract

With the growing use of growth simulation models in sugarcane, the need to provide information for parameterization became necessary, there is seen the great diversity of Brazilian varieties and the importance of biometric data and productivity for the reasoning mathematical modeling. The objective of this work to determine the leaf area, leaf area index, sucrose content, plant height, and fresh and dry biomass of culms in eight varieties according to four levels of irrigation for four sampling times over the first ratoon cane. The experiment was conducted in a greenhouse belonging to the experimental area of the Department of Biosystems Engineering (LEB) of the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ / USP) located in Piracicaba - SP. The basic experiment was conducted at the experimental area of the Department of Biosystems Engineering (LEB) of the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ / USP) located in Piracicaba - SP. The experiment was designed with three sources of variation (PV), as follows: four sampling times, four irrigation levels and eight varieties of sugarcane. Sampling (times) were held quarterly, with the first, approximately 100 days after cutting the

plant cane. The evaluated blades (L50, L75, L100 and L75 *) were the replacement fractions of ET_c with reference to the treatment L100, which kept the soil moisture near field capacity (θ_{cc}) throughout the experiment. The parameterization was carried out based on data collected at the 100 % irrigation depth (L100). The productivity of fresh culms was influenced by water depth in the second time of sampling (~ 205 DAC), at this point there is a reduction of 35% between L100 and L50.

Keywords: Biometric, Water deficit, Modeling

3.1. Introdução

O emprego da modelagem em cana-de-açúcar cresce ano após ano e pesquisadores como Marin et al. (2009, 2013a), Nassif (2010, 2012) e Barros (2011) relatam que a utilização de modelos matemáticos para determinação do potencial produtivo é uma interessante ferramenta a ser aplicada na tomada de decisão dos cultivos de cana-de-açúcar, principalmente nas regiões de expansão do cultivo, caracterizadas, em sua maioria, por uma deficiência hídrica anual acima de 400 mm.

Os principais modelos utilizados para a cana-de-açúcar foram desenvolvidos em condições e variedades diferentes das encontradas no Brasil. O esforço pela parametrização e avaliação destes modelos é fundamental para sua boa aplicabilidade e boa performance; Marin et al. (2011) relatam que o modelo CANEGRO fornece informações relevantes ao longo do ciclo além de estimar a produtividade, após entrada dos dados das variedades e dos ambientes em que estão inseridas.

O modelo CANEGRO utiliza entradas de água, clima e solos (SINGELS et al., 2008) para simular crescimento. Por basear-se na modelagem de processos, além de permitir a estimativa da produtividade, também permite conhecer como se deu o desenvolvimento da cultura ao longo do ciclo de cultivo, pois considera variáveis biométricas, aspectos envolvendo o balanço de água e ciclagem de alguns nutrientes, principalmente o nitrogênio. Entretanto, os testes com nitrogênio ainda estão restritos aos sistemas de produção da África do Sul (JONES et al., 2007; MARIN, 2014). A parametrização do modelo baseia-se na comparação entre dados coletados em campos experimentais e os dados estimados através do modelo. O conjunto de parâmetros que proporciona a máxima semelhança entre dados observados e simulados é então selecionado. As variáveis mensuradas dependem

do conjunto de parâmetros que se pretende parametrizar, mas, de maneira geral, deve-se mensurar variáveis relacionadas com a biomassa da parte aérea, biomassa fresca de colmos, área foliar e biometria da cultura.

Em função da importância dos dados de produtividade e biométricos da cana-de-açúcar e da expansão do cultivo para regiões caracterizadas com déficit hídrico, os objetivos do trabalho relatado neste capítulo foram mensurar a área foliar, o teor de sacarose, a biomassa fresca e seca de colmos em oito variedades em função de quatro níveis de irrigação em quatro épocas de amostragem ao longo do ciclo da primeira soca da cana-de-açúcar.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Considerações Iniciais

O experimento desenvolvido nesta tese de doutorado é parte integrante do projeto FAPESP 2012/50083-7: *"Produtividade da Água em Biomassa e Energia para Variedades de Cana-de-açúcar em Função dos Níveis de Irrigação: Experimentação e Simulação"*, aprovado em Edital da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) oriundo de parceria da referida Fundação com a empresa ODEBRECHT Agroindustrial (antiga ETH-Bioenergia).

O projeto teve duração de 50 meses, sendo conduzindo neste período dois ciclos da cana-de-açúcar: o ciclo da cana-planta entre 2013 e 2014 e o ciclo da primeira cana-soca entre 2014 e 2015. No primeiro ciclo (cana-planta) o principal objetivo foi avaliar o efeito de quatro lâminas de irrigação e quatro intensidades de déficit hídrico na fase de maturação. No segundo ciclo os principais objetivos relacionaram-se com partição de biomassa e conversão em energia, modelagem, parametrização e simulações de modelos.

3.2.2. Caracterização da Área Experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, pertencente à área experimental do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' (ESALQ/USP) localizada em Piracicaba – SP, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 22° 42' 32" S, longitude 47° 37' 45" W e altitude de 546 m.

Conforme a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo *Cwa*, isto é, subtropical úmido, com três meses mais secos (junho, julho e agosto), caracterizado por chuvas no verão e seca no inverno. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C e a do mês mais frio, inferior a 18°C.

A casa de vegetação, Figura 3.1, utilizada no experimento, é composta por três vãos conjugados, com área total de 400 m² e altura do pé-direito de 5,2 m, cobertura plástica e laterais fechadas com tela “sombrite” preta, com aproximadamente 50% de interceptação da radiação global. Internamente a estrutura é provida de um total de 396 vasos (0,333 m³/vaso) assentados sobre base de concreto. Além da estrutura principal foi utilizada outra casa de vegetação denominada aqui de “estufa de apoio” (110 m²), que foi aproveitada para abrigar os quadros de comandos do sistema de irrigação, conjuntos moto-bombas, sistemas de aquisição de dados (dataloggers), servindo, também, de apoio na realização das análises de crescimento, preparo e armazenamento dos materiais coletados.

Figura 3.1 - Vista externa (A) e interna (B) da casa de vegetação; ao fundo a estufa de apoio.

3.2.3. Delineamento Experimental

O delineamento experimental adotado foi em blocos inteiramente aleatorizados com três blocos completos, sendo que um vão da casa de vegetação constitui um bloco. O experimento foi delineado com duas fontes de variação (FV): sendo: quatro lâminas de irrigação e oito variedades de cana-de-açúcar avaliadas em quatro épocas de amostragem

A distribuição dos graus de liberdade das análises de variância (ANOVA) é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Esquema de distribuição dos graus de liberdade (G.L.) para as fontes de variação (F.V.), de acordo com o delineamento experimental e o arranjo de distribuição dos tratamentos.

FV	G.L.			
	Época 1	Época 2	Época 3	Época 4
VAR	7	7	7	7
LAM	3	3	3	3
VAR . LAM	21	21	21	21
Erro	64	64	64	64
Total	95	95	95	95

As amostragens (épocas) foram realizadas trimestralmente. A primeira ocorreu, aproximadamente 100 dias após o corte da cana planta (DAC), repetindo-se novamente após 90 dias (aproximadamente), até a 4ª e última amostragem, em decorrência da colheita final, totalizando-se 376 dias de cultivo.

O fator lâmina de irrigação baseou-se na reposição da demanda evapotranspirométrica de cada variedade. Os níveis adotados constituíram na reposição de 100% (L100) da evapotranspiração potencial da cultura (ETc), mantendo-se a referência 100% na capacidade de campo (θ_{cc}), e frações de 125% (L125), 75% (L75) e 50% (L50) da ETc. Nos primeiros 30 dias após a colheita da cana planta adotou-se somente o nível L100. Após este período iniciou-se a diferenciação dos níveis de irrigação, sendo que os níveis L75 e L50 mantiveram as frações sem alterações até a colheita final. No nível L125 o fracionamento não foi igual até o final; neste caso, irrigou com 125 % da ETc até aproximadamente 150 DAC, depois 30 dias com 100 % da ETc e posteriormente foi realizado uma irrigação com L75 % da ETc e, após reduziu gradativamente 5 pontos percentuais até atingir 50 % da ETc , por volta do 220° DAC, que foi mantido até a colheita, conforme pode ser verificado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Representação gráfica das frações das lâminas aplicadas durante a fase inicial de desenvolvimento e de crescimento dos colmos. Obs. A lâmina de referência é a lâmina do tratamento L100 de cada variedade

As variedades comerciais de cana-de-açúcar utilizadas no experimento foram definidas de comum acordo com os responsáveis técnicos e administrativos da empresa parceira no projeto, contemplando as principais variedades de interesse científico e comercial, sendo estas representativas dos três principais (mais tradicionais) programas de melhoramento do país: Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA); Instituto Agrônomo de Campinas (IAC); Centro de Tecnologia Canavieira (CTC). Entre as oito variedades, incluiu-se uma variedade sul-africana, considerada como um padrão internacional para modelagem dessa cultura.

Ressalta-se que a princípio, atendendo à cláusula terceira do termo de convênio de cooperação firmado entre FAPESP, Odebrecht Agroindustrial e USP (*"Respeitar e fazer respeitar as restrições à divulgação de informações e as limitações impostas por direitos autorais e de propriedade intelectual"*), as variedades foram codificadas. Entretanto, posteriormente foi liberada a identificação. As variedades estudadas foram CTC 15, CTC 17, RB867515, RB92579, RB931011, RB966928, IAC SP-5000 e NCo 376. Para melhor discussão estas variedades foram discutidas como V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8, respectivamente.

que as raízes e também a umidade de uma parcela não interferissem na parcela ao lado. Foi colocada uma camada de 0,10 m de brita no fundo dos vasos e acima desta uma manta geotêxtil (Bidim) para facilitar a drenagem e também isolar as parcelas. (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Detalhe da divisão e enchimento das parcelas

3.2.5. Caracterização química e físico-hídrica dos solos

Após o processo de enchimento das parcelas e previamente ao plantio foram coletadas amostras deformadas para a realização de análises químicas e granulométricas. Após a colheita da cana planta realizou-se, também, coleta de amostra de solo para análises químicas. Os resultados das análises após a colheita da cana planta e sua respectiva interpretação para macronutrientes são apresentados na Tabela 3.2 e para micronutrientes na Tabela 3.3. Com base nesta interpretação foi calculada a adubação e calagem.

Tabela 3.2 – Análise química do solo para macronutrientes em três diferentes camadas

Camada	pH	M.O.	P-resina	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S.B.	CTC	S. bases	Sat. Al	S- SO ₄
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³								V%	m%	mg dm ⁻³
0 - 20	5,8 d	17,8	24,7 c	0,4 a	25,0 d	5,6 c	17,6	0,0	31,3	48,9	63,75	0,0	26,6 d
20 - 40	5,9 d	18,6	21,0 c	0,3 a	23,5 d	7,9 c	17,7	0,0	31,7	49,5	64,25	0,0	37,5 d
40 - 60	5,8 d	19,1	19,0 c	0,3 a	21,2 d	8,4 d	17,7	0,0	29,6	47,4	62,38	0,0	36,9 d

Potencial hidrogeniônico (pH); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P-resina); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); hidrogênio + alumínio (H+Al); soma de bases (S.B.); capacidade de troca catiônica (CTC); enxofre (S) na forma de sulfato (S-SO₄). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos. IAC (2014); Raij et al. (1997).

Tabela 3.3 – Análise Química do solo para micronutrientes em três diferentes camadas

Camada	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	----- DTPA -----				(água quente)
	----- mg dm ⁻³ -----				
0 - 20	0,59 c	22,60 d	1,80 d	2,60 c	0,48 c
20 - 40	0,58 c	23,60 d	1,91 d	2,80 c	0,53 c
40 - 60	0,59 c	26,70 d	1,88 d	3,02 c	0,49 c

Cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos, segundo IAC (2014), Raij et al. (1997)

A caracterização físico-hídrica do solo foi realizada a fim de obter-se a curva de retenção da água no solo, para tanto amostras indeformadas foram coletadas através de trado para amostra indeformada com cilindros de aço inox de 50 cm³. As amostras foram retiradas em três profundidades, 0,10, 0,30 e 0,50 m, representando as camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente.

A determinação das curvas de retenção de água no solo se deu através de mesa de tensão à mesa de tensão (tensões de 1, 2, 4 e 6 kPa) e extratores de “Richards” com placas porosas (10, 30, 50, 100, 500, 1000 e 1500 kPa). Determinou-se ainda a densidade do solo (Ds), densidade das partículas do solo (Dp), porosidade total (PT), bem como a umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

Conforme descrito por Barbosa (2015) no primeiro ciclo (cana-planta) devido à falta de estrutura estável/“definitiva” do solo no início do cultivo optou-se por utilizar, neste primeiro momento, uma caracterização físico-hídrica realizada em um experimento anterior (CHAVES, 2008), com o mesmo solo e mesma metodologia de enchimento dos vasos. Após a estabilidade do solo, realizou-se então a coleta das amostras de solo e caracterização do solo, quando de posse dos resultados e a semelhança entre outros valores optou-se por manter os parâmetros do solo utilizados até aquele momento. Neste experimento (cana soca) devido à necessidade de comparação entre os ciclos da cana planta e cana soca em outras teses/dissertações optou-se por utilizar os mesmos parâmetros conforme Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 – Caracterização físico-hídrica do solo

Camada (m)	θ_{cc}	θ_{pmp}	CAD (mm)	D_s	D_p	PT (%)	Frações granulométricas		
	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$		g cm^{-3}	g cm^{-3}		Areia	Silte	Argila
0,00 – 0,20	0,227	0,106	24,2	1,53	2,65	42,3	75,1	7,8	17,1
0,20 – 0,40	0,226	0,098	25,6	1,50	2,65	43,4	74,5	8,0	17,5
0,40 – 0,60	0,241	0,132	21,8	1,69	2,64	36,0	74,4	8,6	17,0

θ_{cc} : umidade na capacidade de campo (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de 4,85 kPa). θ_{pmp} : umidade no ponto de murcha permanente (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de 1500 kPa). CAD: capacidade de água disponível. D_s : densidade do solo. D_p : densidade de partículas do solo. PT: porosidade total do solo. Adaptado de Chaves (2008)

Tabela 3.5. Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten (1980).

Camada (m)	$\theta_s (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\theta_r (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\alpha (\text{kPa}^{-1})$	m	n
0,00 – 0,20	0,421	0,098	1,3464	0,1799	2,7175
0,20 – 0,40	0,412	0,085	1,5708	0,1648	2,5028
0,40 – 0,60	0,374	0,122	1,1291	0,2749	1,5619

Adaptado de Chaves (2008)

3.2.6. Sistema / Manejo da irrigação e fertirrigação

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, utilizando tubo gotejador com emissor autocompensante, anti-sifão e antidrenante. Cada parcela experimental foi controlada individualmente, sendo instalada uma linha de gotejo com 5 emissores espaçados em 0,20 m e com vazão de 1,6 L h⁻¹ em cada uma das 396 parcelas (Figura 3.5). Desta maneira utilizou-se aproximadamente 1,0 m de tubo gotejador em cada parcela, totalizando uma vazão de 8 L h⁻¹ por parcela, e aproximadamente 3,2 m³ h⁻¹ para todas as 396 parcelas. Para evitar que os emissores trabalhassem voltados para baixo utilizou-se hastes de PCV para fixar o tubo gotejador nas extremidades de cada parcela garantindo que os emissores ficassem voltados para cima, evitando o entupimento por partículas sólidas (FARIA, 2013).

Figura 3.5 – Vista da distribuição dos gotejadores nas parcelas experimentais

O manejo da irrigação foi realizado por monitoramento da tensão da água no solo, utilizando-se tensiômetros com transdutores de vácuo (Figura 3.6). Os tensiômetros foram instalados imediatamente após o transplântio das mudas em três repetições das oito variedades nas parcelas que receberam o nível de irrigação com 100 % da ET_p, em três profundidades: 0,10 m (representando a camada de 0,0 a 0,20 m), a 0,30 m (representando a camada de 0,20 a 0,40 m) e 0,50 m (representando a camada de 0,50 a 0,60 m). Este manejo foi adotado como padrão, servindo como base para a aplicação dos demais níveis de irrigação (L75*, 75 e 50 %).

Figura 3.6 – Tensiômetros com transdutores de vácuo, utilizados para monitoramento da tensão do solo

As leituras dos tensiômetros foram realizadas automaticamente através de um sistema de aquisição e armazenamento de dados (Figura 3.7). O sistema para aquisição de dados de transdutores de vácuo é constituído de módulos microprocessados, sendo que cada módulo dispõe de 96 canais de conversão analógico-digital com 12 bits de resolução. Os módulos dispõem de recursos de software e hardware que asseguram confiabilidade e escalabilidade, de modo que é

possível interligar quantos módulos forem necessários para atender a necessidade da pesquisa. Os módulos foram instalados em um quadro de comando localizado na Estufa de Apoio, caracterizando um sistema de controle centralizado.

Figura 3.7 – Sistema de aquisição e armazenamento de dados desenvolvidos no projeto de pesquisa

Os dados coletados foram inicialmente transformados em potencial matricial da água no solo (ψ_m) (Equação 3.1), descontando-se a pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro para cada profundidade medida. A pressão equivalente descontada foi de 3,0, 5,0 e 7,0 kPa para os tensiômetros que representam as camadas de 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente.

$$\Psi_m = L_t - h_c \quad (3.1)$$

em que:

ψ_m - potencial matricial da água no solo (kPa);

L_t - leitura do tensiômetro ou tensão da água no solo (kPa);

h_c - pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro (kPa);

Após obter os dados do potencial matricial da água no solo (ψ_m) foi calculada a média entre as leituras dos três blocos, obtendo uma leitura para cada camada para cada variedade (24 valores de ψ_m). Com estes valores, foi estimada a umidade (θ), em $m^3 m^{-3}$, através do modelo proposto por Van Genuchten (1980) (Equação 3.2), que relaciona os valores de ψ_m com os respectivos valores de θ , utilizando os parâmetros característicos deste solo apresentados citados anteriormente na Tabela 3.5.

$$\theta(\Psi_m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot |\Psi_m|)^n]^m} \quad (3.2)$$

em que:

$\theta(\Psi_m)$ - umidade volumétrica em função do potencial mátrico, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_r - umidade volumétrica residual do solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_s - umidade volumétrica do solo saturado, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

m e n - parâmetros de regressão da equação, adimensionais;

α - parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, em kPa^{-1} ; e

Ψ_m - potencial mátrico, em kPa .

Assim, com os dados de umidade estimados acima e a caracterização físico-hídrica do solo de cada camada (Tabela 3.4), foram calculadas as lâminas de irrigação necessárias para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo (θ_{cc}) para cada variedade do tratamento L100 (Equação 3.3).

$$L_x = (\theta_{cc} - \theta) \cdot Z \quad (3.3)$$

em que:

L_x - lâmina necessária para elevar a umidade da camada x até a capacidade de campo, em mm ;

θ_{cc} - umidade volumétrica na capacidade de campo para a camada x , em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ - umidade volumétrica atual estimada para a camada x , em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; e

Z - Espessura da camada x , em mm .

A soma das lâminas necessárias de cada camada (Equação 3.4) resultou na lâmina de irrigação a ser aplicada para cada variedade.

$$LI = L_{0,0-0,2} + L_{0,2-0,4} + L_{0,4-0,6} \quad (3.4)$$

em que:

LI - lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, em mm ;

$L_{0,0-0,2}$ - lâmina para elevar a umidade da camada 0,0 a 0,2 m à capacidade de campo, em mm ;

$L_{0,2-0,4}$ - lâmina para elevar a umidade da camada 0,2 a 0,4 m à capacidade de campo, em mm ;

$L_{0,4-0,6}$ - lâmina para elevar a umidade da camada 0,4 a 0,6 m à capacidade de campo, em mm .

Para realização dos cálculos do manejo foi utilizada uma planilha preparada no Software Microsoft Excel® (Figura 3.8), sendo o último passo o cálculo do tempo de irrigação necessário para cada variedade (Equação 3.5). Para o cálculo do tempo de irrigação, adotou-se a vazão do sistema de 8 L h^{-1} para cada parcela e a área de solo da parcela de $0,43 \text{ m}^2$.

$$TI = \frac{LI \cdot A}{Q} \cdot 60 \quad (3.5)$$

em que:

TI - tempo de irrigação, em minutos;

LI - lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, em mm ;

A - área de solo da parcela, em m^2 ;

Q - Vazão aplicada a parcela, em L h^{-1}

DATA	24/02/2015		Início	8:05				
Variedade	Tratamento	Tempo (min)	FINAL					
7	125%	12	8:16		6	75%	26	8:31
7	50%	12	8:16		8	75%	28	8:33
4	125%	16	8:21		2	125%	30	8:35
4	50%	16	8:21		2	50%	30	8:35
7	75%	17	8:22		4	100%	33	8:37
6	125%	18	8:22		5	75%	33	8:38
6	50%	18	8:22		6	100%	35	8:40
8	125%	19	8:23		8	100%	38	8:42
8	50%	19	8:23		1	75%	38	8:43
5	125%	22	8:27		5	100%	44	8:49
5	50%	22	8:27		2	75%	45	8:50
7	100%	23	8:28		1	100%	51	8:55
4	75%	25	8:29		3	125%	56	9:00
1	125%	25	8:30		3	50%	56	9:00
1	50%	25	8:30		2	100%	60	9:05
					3	75%	84	9:28
					3	100%	112	9:56

Figura 3.9 – Ranking das variedades em função dos tempos de irrigação

3.2.7. Plantio, Cultivo e tratos culturais

O plantio da cultura se deu por meio do sistema de plantas pré-brotadas com seleção dos mini-toletes. Com intuito de utilizar colmos com garantia de origem, de qualidade, de sanidade e varietal buscou-os diretamente nos bancos de germoplasma (BAG) das empresas que desenvolveram as variedades utilizadas. Os colmos das variedades CTC são originados do BAG do CTC de Piracicaba-SP, das variedades RIDESA do BAG situado em Araras-SP e da variedade IAC do BAG localizado em Ribeirão Preto-SP. A variedade sul-africana (NCo 376), considerada como um padrão internacional em modelos de crescimento, não foi obtida diretamente da empresa que a desenvolveu. A utilização desta variedade foi possível via disponibilização no BAG do CTC, localizado em Camamu, na Bahia.

Após a coleta dos colmos nos BAG citados anteriormente, os mesmos foram transportados até o LEB/ESALQ para preparo das mudas. Em cada colmo foi selecionado quatro gemas situadas na parte mediana, descartando as basais e apicais. Estas gemas foram plantadas em bandejas cobertas por substrato. Após a brotação e emergência das gemas (mini-toletes) foram selecionadas as mudas para o transplântio. O transplântio das mudas foi realizado no dia 12 de março de 2013. Nesta data, as mudas se encontravam com altura média de 0,35 m e com aproximadamente 40 dias após o plantio (DAP).

Os tratos culturais consistiram, basicamente, do monitoramento do estado fitossanitário e do controle de plantas invasoras. Quando necessário, foram

realizadas aplicações de inseticidas com ingredientes ativos pertencentes aos grupos químicos dos piretróides e neonicotinóides. Para o controle de possíveis doenças fúngicas foram realizadas aplicações preventivas de fungicida com ingrediente ativo pertencente ao grupo químico dos triazóis.

3.2.8. Variáveis Analisadas

3.2.8.1. Área foliar

A área foliar da cana-de-açúcar foi mensurada em quatro épocas de amostragem:

- 30 de maio de 2014 (104° dia);
- 8 de setembro de 2014 (205° dia);
- 29 de novembro de 2014 (287° dia);
- 26 de fevereiro de 2015 (376° dia);

Após o corte basal do colmo, foram coletadas as frações de lâminas de folhas verdes e folhas secas, separando-se aquelas situadas na região de transição, assim como o palmito e o ponteiro que foram separados com corte no ponto natural de quebra. A área de todas as folhas foi medida separadamente (Figura 3.10).

Figura 3.10 – Corte basal, quebra do ponteiro no colmo e separação das frações da cana-de-açúcar

As mensurações da área foliar foram realizadas através do integrador de área foliar da Licor “LI-3100C”, Figura 3.11. Neste aparelho a amostra percorre sob uma fonte de luz fluorescente, o objeto então projetado é refletido por um sistema de três

espelhos para uma câmara de matriz linear. À medida que a amostra passa por baixo da fonte de luz, a área acumulada, em cm^2 , é mostrada no visor LED ou no computador ao utilizar o software Windows®. Resumidamente este aparelho é um scanner de grande porte que consegue medir objetos de grandes dimensões, pois traciona de maneira continua o objeto a ser medido sobre o sensor de imagem.

A área foliar foi mensurada em um total de 192 perfilhos por época de amostragem, sendo um perfilho analisado em cada touceira. Desta avaliação calculou-se a média de duas touceiras constituindo assim a repetição, em um total de 96 amostras. Após a separação da lâmina foliar e da bainha realizaram-se as medidas da área de cada folha; posteriormente estas folhas foram secas em estufa a 65°C por 48 horas para obtenção da massa seca. No tratamento com reposição de 100% da ETc (L100) realizou-se este procedimento folha a folha, medindo a área foliar e pesando individualmente todas as folhas do perfilho. Estes valores foram plotados e submetidos a uma análise de regressão.

A partir destas equações, da massa seca de folhas verdes e massa seca total de folhas (folhas verdes + folhas secas) estimou-se, respectivamente a área foliar verde e área foliar total.

Tradicionalmente, a área foliar da cana-de-açúcar é calculada por meio da equação de Hermann e Camara (1999) que leva em consideração o número de folhas verdes, fator de forma das folhas e dimensões da folha +3. Por este motivo estimou-se área de outras três diferentes maneiras: Equação de Hermann e Câmara; e duas Equações adaptadas de Hermann e Câmara (1999): (1) com base no fator de forma calculado para cada repetição e (2) com base no fator de forma de todas as folhas +3). O fator de forma é obtido pelo ajuste da regressão linear entre as medidas da área foliar, obtidas por meio de integrador de área foliar e o produto do comprimento pela largura ($C \times L$) das folhas. O coeficiente angular resultante desse polinômio de primeiro grau forçado a passar pela origem representa o fator de ajuste ou fator de forma (FERREIRA JUNIOR, 2013).

Figura 3.11 – Integrador de Área Foliar LICOR “LI-3100C”

3.2.8.2. IAF

Os dados de área foliar foram utilizados para estimar a o índice de área foliar (IAF). O conceito de IAF foi introduzido por WATSON (1947), definindo-o como a razão entre a área foliar do dossel e área projetada da mesma sobre o solo, Equação 3.6.

$$IAF = \frac{AF}{AP} \quad (3.6)$$

Em que:

IAF - Índice de Área Foliar, m²/m² ...

AF - Área foliar da cultura

AP - Área projetada pela cultura

Considerou-se que como área projetada pela cultura a área útil ocupada pelo dossel das plantas em cada parcela (0,63 m² parcela⁻¹).

A partir dos dados de Área Foliar calculou-se o Índice Área Foliar Verde (IAF_V) e o Índice de Área Foliar Total (IAF_T) das oito variedades nas quatro épocas de amostragem.

3.2.8.3. Sacarose

A determinação do teor de sacarose foi realizada em decorrência das análises tecnológicas. Para realização destas análises, utilizou-se a metodologia preconizada pelo CONSECAN (2006).

Assim, os colmos de cada parcela (duas touceiras) foram desintegrados em um desintegrador de cana Engehidro DCE 2600®. Este material foi então homogeneizado no homogeneizador Engehidro HCE-250® (Figura 3.12A), obtendo-se uma amostra mínima de 2,0 kg, representativa de cada parcela (Figura 3.12B). Desta amostra homogeneizada foi pesado 0,50 kg de material, em balança analítica digital, sendo esta quantidade de material submetido a uma pressão de 250 kgf cm⁻², durante sessenta segundos utilizando-se de uma prensa hidráulica (MA098/CANA - Marconi®) (Figura 3.12C). Após a prensagem, foram obtidos dois produtos, o caldo (CA), que foi armazenado em Becker de 600 ml, e o bagaço úmido ou bolo úmido (BU), que foi armazenado em recipientes descartáveis (marmitas) de alumínio (Figura 3.12D).

Após a extração do caldo, foi determinado, entre outras variáveis, o teor de brix e Pol da cana.

3.2.8.3.1. Brix do caldo - Brix (°Brix)

Com uma amostra do volume de caldo extraído, realizaram-se as medidas de Brix do caldo em °Brix, que representa o teor de sólidos solúveis por cento, em peso de caldo. Para esta análise, utilizou-se um refratômetro digital de bancada (Rudolph J47®) com correção automática de temperatura (20 °C) (Figura 3.12E).

3.2.8.3.2. POL da cana-de-açúcar - POL (%)

Para o cálculo da POL da cana-de-açúcar (Equação 3.7) necessita-se determinar a pol do caldo (Equação 3.8), o teor de fibra (Equação 3.9) e o coeficiente “C” (Equação 3.10). Inicialmente parte da amostra de caldo extraída foi levada para o processo de clarificação (Figura 3.12F). Para isso, utilizou-se aproximadamente 6,0 g da mistura clarificante à base de alumínio em 200 ml de caldo. Após agitação da mistura e filtragem, obteve-se o caldo clarificado (Figura 3.12G), no qual foram realizadas as leituras sacarimétricas - LPb (°Z), utilizando-se um sacarímetro digital (Autopol I Rudolph®) (Figura 3.12H). Com os dados das leituras sacarimétricas, foi calculada a POL do caldo pela Equação 3.8.

$$PC = S \cdot (1 - 0,01 \cdot F) \cdot (1,0313 - 0,00575 \cdot F) \cdot C \quad (3.7)$$

em que:

S - teor de sacarose aparente, por cento, em massa de caldo; (% POL do caldo);

C = Coeficiente

F = % de Fibra da cana

$$S = (1,00621 \cdot LAI + 0,05117) \cdot (0,2605 - 0,0009882 \cdot Brix) \quad (3.8)$$

$$F = 0,08 \cdot PBU + 0,876 \quad (3.9)$$

$$C = 1,013 - 0,00575 \cdot F \quad (3.10)$$

em que:

S - teor de sacarose aparente, por cento, em peso de caldo;

LAI - leitura sacarimétrica obtida com a mistura clarificante à base de alumínio, em °Z; e

Brix - brix do caldo, em °Brix.

PBU = Peso do bagaço úmido da prensa, em gramas

(A)

(B)

(C)

(D)

(E)

(F)

(G)

(H)

Figura 3.12 – Desintegração e homogeneização dos colmos (A); Detalhe da coleta da amostra homogeneizada representativa da parcela (B); Pesagem e prensagem do material para extração do caldo (C); Detalhe do caldo e bolo úmido obtidos após a prensagem (D); Refratômetro digital de bancada (Rudolph J47®) para leitura de Brix (E); Vista geral do processo de clarificação (F); Detalhe do caldo clarificado (G); Sacarímetro digital (Autopol I Rudolph®) para leitura sacarimétrica (H).

3.2.8.4. Massa Fresca de Colmos

Foram realizadas, imediatamente após a colheita com o auxílio de balança digital semianalítica, pesagens de matéria fresca de colmos de cada repetição.

As produtividades de colmos por hectare - TCH (t ha⁻¹) foram extrapoladas considerando-se a soma da biomassa fresca de colmo das duas touceiras e a área útil ocupada pelo dossel das plantas em cada parcela. Para isso, foi calculada a produtividade para a área de solo da parcela (0,43 m² parcela⁻¹) e também para a área total disponível para o dossel, considerando os corredores (0,81 m² parcela⁻¹). De acordo com Barbosa (2015) a primeira área superestima e a segunda subestima os resultados, desta maneira este mesmo autor recomenda que se considere a média entre estas duas áreas de parcela (Equação 3.11). Esta metodologia foi adotada, uma vez que há dificuldade e incerteza nas extrapolações de cultivos em ambiente protegido para os padrões geralmente adotados no campo (efeito "bouquet"). Apesar de o objetivo ser comparar os tratamentos sob a mesma condição de cultivo é necessário que estes valores estejam dentro de uma grandeza condizente com as possibilidades da cana-de-açúcar (BARBOSA, 2015 ; LEAL, 2012).

$$TCH = \frac{\left(\frac{BFC}{0,43} \cdot 10\right) + \left(\frac{BFC}{0,81} \cdot 10\right)}{2} \quad (3.11)$$

em que:

TCH - produtividade de colmos por hectare, em t ha⁻¹;

BFC - biomassa fresca de colmos, em kg;

0,43 e 0,81 - área de solo da parcela e área disponível para o dossel das plantas, em m²; e

10 - Fator para conversão de kg m⁻² para t ha⁻¹.

3.2.8.5. Biomassa seca da parte aérea das plantas - BIOM (g)

A biomassa seca total da parte aérea das plantas foi obtida somando-se a matéria seca de todas as partes amostradas da planta durante a colheita e também dos limbos foliares secos coletados ao longo do experimento. Sendo assim, após a secagem do material em estufa de circulação forçada de ar, somou-se a matéria seca de perfilho improdutivo, limbo foliar total, bainha, desponte, e colmo de cada parcela. Ressalta-se que a obtenção da matéria seca foi obtida diretamente pela secagem do material em estufa a 65° C, durante o tempo necessário para atingir massa constante, medindo-o em balança analítica digital.

3.2.8.6. Número de perfilhos por touceira

A contagem do número de perfilhos vivos e senescentes ocorreu a cada avaliação mensal até a segunda época de amostragem e, posteriormente na terceira e quarta amostragens. Considerou-se como perfilho senescentes aqueles que apresentaram a folha +1 com menos de 25% da área foliar verde.

3.2.8.7. Número de folhas verdes e Folhas secas

A contagem do número de folhas verdes ocorreu a cada avaliação mensal até a segunda época de amostragem, e posteriormente na terceira e quarta amostragens. Contabilizou-se o número de folhas totais e número de folhas totalmente expandidas (+1). Considerou-se como verdes as folhas com pelo menos 75% da área foliar verde.

3.2.9. Análise Estatística

As análises de variância das variáveis avaliadas foram realizadas pelo software SISVAR versão 5.6 (Ferreira, 2011). Para a comparação das médias utilizou-se o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

3.3. Resultados e Discussão

3.3.1. Irrigações (Demanda Hídrica)

Como explicado anteriormente, após as leituras do potencial de água no solo calculou-se o tempo necessário para irrigação. Durante todo o ciclo realizou-se um total de 149 irrigações em uma frequência de dois a três dias. Nas primeiras 10 irrigações não houve diferenciação entre variedades, aplicou-se uma lâmina fixa enquanto adequava o sistema automático de coleta de dados da tensão de água no solo.

O resumo das lâminas de irrigação acumulada é apresentado na Tabela 3.6. Por se tratar de fracionamentos da lâmina de referência verifica-se que em todos os tratamentos houve uma divisão em três grupos, o primeiro (maior demanda)

composto pelas variedades V2 e V3, o segundo grupo (V1, V4, V5 e V8) e o terceiro grupo (menor demanda) presente as variedades V6 e V7.

No tratamento L100 a lâmina de irrigação acumulada no grupo de maior demanda foi superior a 2920 mm, o grupo intermediário com consumo de aproximadamente 2400 mm, e o terceiro grupo inferior a 1950 mm. Com relação ao tratamento L75 a demanda foi de aproximadamente 2300 mm, 1850 e 1480 mm respectivamente nos grupos 1, 2 e 3. Os valores relativos à lâmina de L50 foram de 1570, 1320 e 1050 respectivamente para os grupos de alta, média e baixa demanda. No tratamento L75* observou-se nas variedades V2 e V3 consumo hídrico de aproximadamente 2100 mm, o segundo grupo (V1, V4, V5 e V8) com demanda entre 1750 e 1850 mm e o terceiro grupo (V6 e V7) com, aproximadamente 1400 mm de consumo ao longo do ciclo.

Tabela 3.6 – Irrigação total acumulada (mm) por parcela nos tratamentos L100, L75, L50 e L75* das oito variedades estudadas

Nível de Irrigação	DAC	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
L100	1	13	13	13	13	13	13	13	13
	84	354	349	322	362	285	316	279	296
	152	610	655	658	641	579	534	487	512
	217	965	1165	1113	1021	1073	906	825	937
	270	1434	1833	1714	1517	1628	1278	1233	1538
	326	1869	2473	2379	2002	2157	1624	1579	2138
	372	2291	2956	2921	2386	2545	1890	1933	2510
L50	1	13	13	13	13	13	13	13	13
	84	255	247	234	256	210	227	204	221
	152	383	400	402	395	357	336	308	329
	217	560	655	630	585	604	522	477	542
	270	801	995	936	840	888	715	688	848
	326	1030	1326	1280	1093	1163	899	872	1159
	372	1259	1586	1569	1303	1375	1050	1067	1364
L75	1	13	13	13	13	13	13	13	13
	84	304	298	278	309	248	272	241	259
	152	497	527	530	518	468	435	397	421
	217	763	910	871	803	839	714	651	739
	270	1118	1414	1325	1178	1258	997	960	1193
	326	1449	1900	1829	1548	1660	1261	1225	1649
	372	1775	2271	2245	1844	1960	1470	1500	1937
L75*	1	13	13	13	13	13	13	13	13
	84	403	400	365	415	323	360	316	334
	152	723	782	786	764	690	633	576	603
	217	1008	1179	1141	1068	1078	924	841	930
	270	1251	1521	1450	1324	1364	1118	1052	1238
	326	1479	1852	1793	1577	1639	1301	1236	1549
	372	1708	2111	2082	1787	1851	1453	1431	1753

Observa-se nas Figuras 3.13 A e 3.13 B que o potencial mátrico médio de cada irrigação ao longo do ciclo de cultivo. Verifica-se que as irrigações foram realizadas, em grande parte do ano com potencial mátrico inferior a 45 kPa, o que garantiu as plantas a condição próxima a capacidade de campo em todo o ciclo. Com exceção da variedade V1, o potencial mátrico observado na profundidade de 50 cm foi inferior ao potencial mátrico encontrando nas profundidades de 10 e 30 cm, o que reafirma a qualidade das irrigações. O volume irrigado foi adequado às demandas de cada variedade e garantiu umidade ideal para o pleno desenvolvimento.

Figura 3.13 A - Média do Potencial mátrico do solo em função das variedades V1, V2, V3 e V4 nas profundidades de 10 cm (Ψ_{10}), 30 cm (Ψ_{30}) e 50 cm (Ψ_{50})

Figura 3.13 B - Média do Potencial mátrico do solo em função das variedades V5, V6, V7 e V8 nas profundidades de 10 cm (Ψ_{10}), 30 cm (Ψ_{30}) e 50 cm (Ψ_{50})

3.3.2. Área Foliar e IAF

A área foliar em cana-de-açúcar, tradicionalmente, é estimada pela Equação de Hermann e Câmara (1999) que leva em consideração o fator de forma das folhas. Neste experimento correlacionou-se a área foliar com a massa seca das folhas de cana-de-açúcar. Monteiro et al. (2005) utilizou esta mesma metodologia na cultura do algodoeiro e conclui que o “método das massas” é a maneira mais fácil e prática de estimar a área foliar uma vez que não precisa medir folhas individualmente. A partir das análises de regressão verificou-se que existe uma relação linear entre a área foliar e massa de folhas, desta maneira calculou-se o coeficiente angular que representa esta relação. Para cada época de amostragem e cada variedade foi gerado um coeficiente que representa a relação entre a área e massa das folhas naquele período.

Os coeficientes que representam a relação entre Massa e Área Foliar encontram-se na Figura 3.14 e Tabela 3.7. Verifica-se nestas figuras que as equações se mostraram adequadas para a estimativa da AF, pois elas apresentam, na média, coeficiente de determinação R^2 de 85%.

Considerando todas as variedades e as quatro épocas de amostragem obteve-se um coeficiente angular médio de 80,44, ou seja, para cada grama de folha tem-se 80,44 cm² de AF. Considerando as quatro épocas de amostragem dentro da mesma variedade observa-se que as variedades V2 e V4 foram as que obtiveram os maiores coeficientes. As variedades V5 e V8 foram as que obtiveram a relação mais baixa, isto é, cada grama de folha representa uma menor área foliar. Nas variedades V1 e V2 observa-se uma maior diferença entre os coeficientes de cada época de amostragem. Nestas duas variedades a diferença entre o maior e o menor coeficiente superou a relação de 1:20, ou seja, uma grama de folha para cada 20 cm² de área. Nas demais variedades esta diferença foi inferior a 14,5 cm². Considerando que em um metro quadrado de área de cana-de-açúcar tenha aproximadamente 500 g de folhas verdes, esta diferença de 20 cm² representa um IAF de 1 m²/m².

Tabela 3.7 – Coeficientes angulares que representam a relação entre a massa seca de folhas Verdes totalmente expandidas e a área foliar destas mesmas folhas em função das quatro épocas de amostragem e das oito variedades

Variedades	Épocas de Amostragem								Média (cm² g⁻¹)	CV (%)
	1		2		3		4			
	CMAF (cm² g⁻¹)	R² (%)	CMAF (cm² g⁻¹)	R² (%)	CMAF (cm² g⁻¹)	R² (%)	CMAF (cm² g⁻¹)	R² (%)		
V1	86,19	90,76	69,27	90,58	75,81	96,71	64,69	84,90	73,99	12,61
V2	107,00	89,56	89,26	51,40	85,99	93,18	86,76	96,79	92,25	10,76
V3	86,25	93,50	87,22	93,90	75,94	92,80	72,79	95,89	80,55	9,02
V4	98,87	67,91	97,95	88,95	99,84	96,96	88,59	94,13	96,31	5,40
V5	71,92	85,58	75,60	96,57	72,36	76,91	69,97	74,21	72,46	3,22
V6	79,15	57,74	73,34	99,44	68,53	76,47	72,42	82,00	73,36	5,98
V7	88,48	84,47	79,45	91,68	80,87	64,28	80,35	92,55	82,29	5,07
V8	80,82	90,74	75,29	88,74	66,50	88,80	66,67	90,35	72,32	9,67
Média (cm² g⁻¹)	87,33	82,53	80,92	87,66	78,23	85,76	75,28	88,85	80,44	6,39
CV (%)	12,77		11,95		13,76		11,92			

CMAF – Coeficiente Angular da Regressão entre **M**assa Seca de **F**olha e **Á**rea **F**oliar

Figura 3.14 – Regressão entre massa de folhas e Área Foliar das oito variedades (V1), (V2), (V3), (V4), (V5), (V6), (V7), e (V8)

A análise de variância, Tabela 3.8, indica que houve diferença altamente significativa ($p < 0,01$) entre as variedades e entre as lâminas nas quatro épocas de amostragem. Ocorreu também interação, ao nível de 1% ($p < 0,01$), entre variedades e lâminas na quarta época de amostragem.

A média geral do IAF_v variou de 2,82 m² m⁻² (época 1) a 4,82 m² m⁻² (época 3), chegando ao final do ciclo com 3,51 m² m⁻².

Tabela 3.8 – Resumo da Análise de Variância da Área Foliar Verde (AF_v) e Índice de Área Foliar Verde (IAF_v) com valores de F e sua significância nas quatro épocas de amostragem

Fontes de Variação	Valores de F							
	Época 1		Época 2		Época 3		Época 4	
Variedade (Var)	11,07**		9,54**		22,20**		10,98**	
Lâmina (Lam)	10,57**		5,57**		72,53**		156,13**	
VAR.LAM	1,21 ^{ns}		0,90 ^{ns}		1,23 ^{ns}		2,79**	
CV (%)	19,51		25,84		16,73		16,29	
Média Geral	AF _v (m ²)	IAF _v (m ² /m ²)	AF _v (m ²)	IAF _v (m ² /m ²)	AF _v (m ²)	IAF _v (m ² /m ²)	AF _v (m ²)	IAF _v (m ² /m ²)
	0,89	2,82	1,24	3,95	1,52	4,82	1,11	3,51

NS: não significativo; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade

Analisando os dados de área foliar e índice de área foliar ao nível de variedade, independente de lâmina (Tabela 3.9), verifica-se que a V6 foi a que obteve os menores resultados em todas as épocas de amostragem, atingindo, na média, valores inferiores a 1,0 m² de AF. Com exceção da V6, todos os menores IAF_v e AF_v aconteceram na primeira época de amostragem (~90 DAC) e os valores máximos ocorreram na terceira época de amostragem (~290 DAC), estágio de máximo desenvolvimento da cultura. Destaca-se a variedade V2 que alcançou até 7,03 m² m⁻² de IAF_v na terceira avaliação.

Os valores médios de IAF_v alcançados nestas variedades estão próximos dos encontrados por outros autores. Farias et al. (2008) em experimento com a variedade SP 79 1011 obteve IAF máximo de 6,82 m² m⁻², observado em torno dos 152 DAP em condições de irrigação. Scarpari e Beauclair (2008) verificaram IAF máximo de 6,41 e 4,27 m² m⁻², respectivamente nas variedades SP 80-3280 e RB855156. Outros autores encontraram um valor máximo de IAF de 7,60 m² m⁻² (SAN JOSÉ e MEDINA, 1970), 5,00 m² m⁻² (YOON, 1971). Varela (2002) aponta 7,08 m² m⁻² como o IAF máximo da cultura, atingindo tal valor aos 288 dias. Sandhu et al. (2012) encontrou, em média, IAF de 2,98 m² m⁻², mas com variação de 0,83 a 7,38

$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$. Farias et al. (2007) trabalhando com reposição hídrica de 100% da ETc obteve IAF máximo de $4,00 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ aos 180 dias após a brotação.

Tabela 3.9 – Área Foliar Verde (AF_v) e Índice de Área Foliar Verde (IAF_v) e teste de médias das oito variedades, independente de lâmina, dentro de cada época de amostragem

Variedade	Época 1			Época 2			Época 3			Época 4		
	AF (m^2)	IAF (m^2/m^2)		AF (m^2)	IAF (m^2/m^2)		AF (m^2)	IAF (m^2/m^2)		AF (m^2)	IAF (m^2/m^2)	
V1	1,01	3,19	a	1,10	3,48	b	1,49	4,74	b	1,15	3,67	b
V2	1,13	3,60	a	1,62	5,14	a	2,21	7,03	a	1,16	3,67	b
V3	0,88	2,81	b	1,36	4,31	a	1,39	4,41	b	1,36	4,33	a
V4	1,05	3,32	a	1,41	4,47	a	1,56	4,94	b	1,16	3,68	b
V5	0,65	2,05	c	1,18	3,73	b	1,52	4,83	b	1,09	3,47	b
V6	0,74	2,34	c	0,65	2,06	c	0,95	3,02	c	0,79	2,49	d
V7	0,77	2,45	c	1,30	4,12	a	1,44	4,56	b	1,19	3,78	b
V8	0,88	2,8	b	1,34	4,26	a	1,58	5,03	b	0,95	3,02	c
Média	0,89	2,82		1,25	3,95		1,52	4,82		1,11	3,51	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

O estudo das lâminas, independente de variedades, Tabela 3.10, mostra pelo teste de Scott-Knot ao nível de 5% ($p < 0,05$) que valores mais elevados IAF_v foram alcançados no tratamento sem restrição hídrica (L100), em as épocas de amostragem. Este desempenho foi estatisticamente superior a uma ou mais lâminas. Analisando o tratamento L75* nota-se o efeito do déficit hídrico ao longo do ciclo, uma vez que o IAF_v alcançado nas duas primeiras épocas de amostragem é estatisticamente igual ao alcançado por L100. Este desempenho, entretanto, não é observado nas épocas três e quatro, a qual mostra o IAF_v, em L75*, estatisticamente igual, porém numericamente inferior ao encontrado no tratamento L50. Neste sentido Inman-Bamber e Smith (2005) cita que a expansão da folha é dependente das relações hídricas. Além da redução da expansão foliar em condições de estresse ambiental, genótipos mais sensíveis podem reduzir também a massa de folhas, área foliar verde e aceleram o processo de senescência de folhas verdes o que intensifica a redução da área foliar (INMAN-BAMBER, 2004; WAHID, 2004).

Tabela 3.10 – Área Foliar Verde (AF_V) e Índice de Área Foliar Verde (IAF_V) e teste de médias das quatro lâminas, independente de variedade, dentro de cada época de amostragem

Lâmina	ÉPOCA 1			ÉPOCA 2			ÉPOCA 3			ÉPOCA 4		
	AF (m ²)	IAF (m ² /m ²)		AF (m ²)	IAF (m ² /m ²)		AF (m ²)	IAF (m ² /m ²)		AF (m ²)	IAF (m ² /m ²)	
L 50	0,74	2,35	c	1,11	3,54	b	1,08	3,42	d	0,84	2,66	c
L 75	0,86	2,72	b	1,11	3,51	b	1,54	4,89	b	1,00	3,18	b
L 100	0,98	3,11	a	1,40	4,44	a	2,12	6,72	a	1,78	5,66	a
L 75*	0,98	3,11	a	1,35	4,30	a	1,34	4,25	c	0,80	2,55	c
Média	0,89	2,82		1,24	3,95		1,52	4,82		1,11	3,51	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

A AF_V e o IAF_V de cada variedade em cada lâmina são apresentados na tabela 3.11 e, na Figura 3.15, estão representados adicionalmente a AF_T e o IAF_T. Como pode ser observado em todas as variedades e lâminas, com exceção de V3-L50 e V4-L50, a AF_T e IAF_T aumentaram entre uma amostragem e outra, o que já era esperado uma vez que o crescimento é contínuo e a emissão de folhas não cessa na época de maturação. Com relação ao IAF_V e AF_V nota-se que houve redução entre a terceira e quarta época de amostragem em todas as combinações variedades e lâminas, exceto em V3-L100 e V6-L75*. Em média a redução foi de 25%, porém alcançou valores de até 65%.

Na primeira avaliação nota-se a sensibilidade ao déficit da V8, uma vez que no tratamento L100 seu desempenho alcançou, entre todas as variedades, o terceiro maior IAF (3,49 m² m⁻²) e o pior desempenho na lâmina de 50% (L50), com 1,75 m² m⁻² de IAF.

Na segunda época de amostragem o maior IAF_V (6,51 m² m⁻²) ocorreu na V2 na lâmina L75* e o menor IAF_V (1,37 m² m⁻²) foi observado na V6 na lâmina L50. Na amostragem três o IAF_V variou de 8,95 m² m⁻² (V4-L100) a 2,13 m² m⁻² (V6-L50).

Na quarta época de amostragem, quando houve interação entre variedades e lâminas, o maior IAF_V (6,93 m² m⁻²) ocorreu na V3 na lâmina L100. Esta variedade é considerada tardia, possivelmente por este motivo seu IAF_V aumentou em relação à terceira época de amostragem. O menor IAF_V (1,49 m² m⁻²) foi observado na V8 na lâmina L75*, demonstrando sua sensibilidade ao déficit hídrico, pois neste período o tratamento L75* consistiu na redução do fracionamento da lâmina a 50% ETc.

Tabela 3.11 – Área Foliar Verde (AF_V) e Índice de Área Foliar Verde (IAF_V) das oito variedades em função de cada lâmina dentro de cada época de amostragem

Variedade	Lâmina	Área Foliar Verde (m ²)				Índice de Área Foliar Verde (m ² m ⁻²)			
		Época 1	Época 2	Época 3	Época 4	Época 1	Época 2	Época 3	Época 4
V1	L50	0,84	0,83	1,07	0,94	2,66	2,65	3,40	2,98
	L75	1,04	0,91	1,30	1,11	3,30	2,90	4,12	3,52
	L100	0,99	1,52	2,15	1,78	3,16	4,84	6,82	5,66
	L75*	1,15	1,11	1,45	0,79	3,67	3,53	4,61	2,49
V2	L50	0,98	1,32	1,76	0,71	3,11	4,19	5,60	2,27
	L75	1,03	1,38	2,45	0,89	3,26	4,39	7,79	2,82
	L100	1,31	1,72	2,73	2,16	4,15	5,46	8,67	6,84
	L75*	1,22	2,05	1,91	0,87	3,88	6,52	6,06	2,75
V3	L50	0,87	1,49	1,01	0,99	2,76	4,74	3,20	3,15
	L75	0,82	0,97	1,45	1,23	2,60	3,06	4,61	3,91
	L100	0,91	1,62	1,97	2,18	2,89	5,15	6,24	6,93
	L75*	0,94	1,35	1,13	1,05	2,97	4,29	3,60	3,33
V4	L50	0,82	1,58	0,97	0,88	2,61	5	3,09	2,80
	L75	1,13	1,22	1,52	1,13	3,58	3,86	4,82	3,59
	L100	1,28	1,35	2,49	1,81	4,08	4,3	7,89	5,73
	L75*	0,95	1,48	1,25	0,82	3,03	4,7	3,97	2,60
V5	L50	0,59	0,97	1,01	0,79	1,87	3,09	3,22	2,52
	L75	0,54	1,12	1,71	1,00	1,72	3,54	5,44	3,18
	L100	0,67	1,41	2,05	1,80	2,13	4,47	6,51	5,71
	L75*	0,78	1,20	1,31	0,78	2,49	3,82	4,16	2,48
V6	L50	0,59	0,43	0,67	0,64	1,86	1,38	2,12	2,03
	L75	0,79	0,66	0,93	0,76	2,51	2,08	2,95	2,40
	L100	0,75	0,75	1,52	1,05	2,37	2,39	4,83	3,33
	L75*	0,83	0,75	0,69	0,70	2,62	2,39	2,18	2,21
V7	L50	0,68	1,11	0,92	1,09	2,17	3,53	2,92	3,45
	L75	0,76	1,25	1,41	1,09	2,41	3,96	4,48	3,46
	L100	0,81	1,43	1,82	1,63	2,57	4,53	5,77	5,17
	L75*	0,84	1,41	1,60	0,96	2,66	4,47	5,07	3,05
V8	L50	0,55	1,18	1,20	0,65	1,73	3,74	3,80	2,07
	L75	0,76	1,34	1,54	0,81	2,40	4,27	4,88	2,59
	L100	1,10	1,38	2,21	1,87	3,50	4,38	7,03	5,94
	L75*	1,13	1,47	1,38	0,47	3,58	4,66	4,39	1,49

Figura 3.15 – Área Foliar Verde (AF_V) e Total (AF_T), Índice de Área Foliar Verde (IAF_V) e Total (IAF_T), das variedades: (A) V1 e V2; (B) V3 e V4; (C) V5 e V6; (D) V7 e V8

Como observado na Figura 3.16, os resultados estimados através da equação Massa x AF foram os que mais se aproximaram da área foliar real, a única exceção foi na V7 em que as Equações de Hermann e Câmara (1999) adaptadas foram as que mais se aproximaram da AF real. Estes resultados comprovam que a utilização de equações que relacionam a Massa de Folhas com sua AF foi assertiva. Recomenda-se a utilização, principalmente em estudos experimentais, da regressão linear entre Massa e AF para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. A utilização da Equação de Hermann e Câmara (1999) adaptada com fatores de forma específicos para cada variedade também é uma boa opção. Simões et al. (2013) estimou a AF com fator de forma 0,75 e fatores de forma mais específicos para variedades SP716949, VAT90212, SP943206 e Q124 e conclui que a utilização de fatores de forma específicos para cada variedade na estimativa de área foliar de cana-de-açúcar apresentou redução mais significativa do erro.

Figura 3.16 – Área Foliar, de um único colmo, real e estimada pela Regressão entre Massa e Área Foliar, pela Equação de Hermann e Câmara (1999) e duas Equações adaptadas de Hermann e Câmara (1999): (1) com base no fator de forma calculado para cada repetição e (2) com base no fator de forma de todas as folhas +3.

Na Figura 3.17, encontra-se os fatores de formas (FF) calculados para folhas classificadas entre +13 e -4. Os fatores aqui apresentados correspondem à média do FF de folhas da primeira e da segunda época de amostragem. Observa-se alta redução do FF das folhas mais novas em comparação com as folhas totalmente expandidas, principalmente nas folhas -2, -3 e -4, a utilização do FF destas folhas

pode subestimar área foliar. Nas folhas totalmente expandidas (até a folha +1), o fator de forma variou de 0,53 a 0,69.

Figura 3.17 – Fator de Forma de folhas verdes totalmente expandidas e não expandidas por variedade

Na Figura 3.18 encontra-se o FF das folhas verdes totalmente expandidas entre a folha +7 e a folha +1 em todas as épocas de amostragem. Observa-se que em todas as variedades o fator de forma é inferior aos 0,75 utilizado na equação de Hermann e Câmara (1999), demonstrando a importância da adaptação da equação para as novas variedades.

Observa-se nesta mesma Figura 3.18, que os dados encontrados na terceira época de amostragem não mostram similaridade com as demais épocas, isto ocorreu em função de erro de leitura do integrador de área foliar na mensuração do comprimento e da largura máxima, detectado na terceira época de amostragem. Por este motivo os dados, apesar de apresentados não estão inclusos no fator de forma médio.

O fator de forma médio (Folha +7 até Folha +1), Figura 3.18, foi de 0,66 em V1, 0,64 para V2, 0,62 em V3, 0,64 para V4, 0,60 em V5, 0,60 na V6, 0,67 para V7 e 0,60 na variedade V8. Ferreira Junior (2013) encontrou fator de forma de 0,65 para a

variedade. Outros autores relatam em diversas variedades valores variando de 0,60 até aproximadamente 0,73. Robertson et al. (1998) em experimento realizado na Austrália relata para a variedade Q117 um fator de forma igual a 0,62. Sinclair et al. (2004) observaram em fator de forma variando entre 0,70 (CP72-2086) e 0,73 (CP89- 2143). Silva (2009) em experimento realizado na Bahia (Brasil) encontrou para a variedade RB92579 fator de forma igual a 0,69.

Figura 3.18 – Fator de Forma das folhas (+7,+6,+5,+4,+3, +2, +1) das diferentes variedades de cana-de-açúcar nas quatro épocas de amostragem e fator de forma médio de cada folha.

3.3.3. Sacarose

3.3.3.1. Brix

O Brix representa a porcentagem de sólidos solúveis contidos em uma solução, por este motivo este apresenta relação direta com o conteúdo de sacarose no caldo da cana-de-açúcar (LAVANHOLI, 2008). Nas Figuras 3.19 e 3.20 encontra-se a representação gráfica do Brix em três épocas de amostragem (Época 2, Época 3 e Época 4). Não foi realizada a análise tecnológica na primeira época de amostragem, uma vez que não tinha biomassa fresca de colmos suficiente para realização dos procedimentos conforme as normas do CONSECANA (2006).

Como esperado o valor médio do Brix na segunda época de amostragem (13,87 °Brix) foi inferior à média da época três (16,44 °Brix) e da época quatro (17,35 °Brix).

Analisando as lâminas dentro de cada variedade, destaca-se que em L100, em praticamente todas as variedades e épocas de amostragem o brix foi inferior ao obtido nos demais tratamentos (L50, L75 e L75*). O tratamento L75* obteve desempenho numericamente superior aos demais tratamentos em 70% das combinações (Época x Variedade) possíveis. Este tratamento caracterizou-se por sofrer grande variação no fracionamento da lâmina em relação à lâmina de referência – iniciou o ciclo com 100% ETc, foi submetido à 125% ETc e terminou o ciclo com 50% ETc. Em um intervalo de aproximadamente 70 dias (155 DAC a 225 DAC) o fracionamento foi reduzido de 125% ETc para 50%; esta redução pode ter acelerado o processo de senescência foliar o que resultou no aumento da porcentagem de sólidos solúveis. Na Figura 3.20, observa-se que nos tratamentos L50, L75 e L75* os valores alcançados na terceira época de amostragem têm mais similaridade com os valores alcançados na quarta época de amostragem. Ao contrário, no tratamento L100 os resultados da terceira época assemelham-se mais com os dados alcançados na segunda época de amostragem; isto se justifica justamente pelo fato dos tratamentos com déficit acelerarem o processo de senescência de folhas verdes.

Com relação às variedades destaca-se a V6 que por se tratar de uma variedade precoce apresentou teores de Brix, na segunda época de amostragem, superior ao alcançado por outras variedades na terceira época de amostragem.

Figura 3.19 – Porcentagem de sólidos solúveis (°BRIX) das quatro lâminas de irrigação em função de cada variedade em três épocas de amostragem (Época 2, Época 3 e Época 4)

Figura 3.20 – Porcentagem de sólidos solúveis (°BRIX) das oito variedades de cana-de-açúcar em função das quatro lâminas de irrigação em três épocas de amostragem (Época 2, Época 3 e Época 4)

3.3.3.2. Sacarose aparente da Cana-de-Açúcar – (% Pol da Cana)

A POL é a variável que indica o teor de sacarose aparente da na cana-de-açúcar, ou seja, qual a porcentagem daquele colmo é açúcar. A análise de sacarose foi realizada nas épocas 2, 3 e 4, pois na época 1 não havia biomassa fresca de

colmos suficiente para realização da análise tecnológica de acordo com as normas do CONSECANA (2006).

De acordo com análise de variância, Tabela 3.12, verifica-se que houve diferença altamente significativa ($p < 0,01$) entre as variedades nas três épocas de amostragem (2, 3 e 4), ocorrendo diferença na mesma significância ($p < 0,01$) entre lâminas na terceira época. Houve também diferença significativa ($p < 0,05$) entre as lâminas na segunda época de amostragem e não ocorreu interação entre variedades e lâminas em nenhuma das épocas de amostragem.

Tabela 3.12 – Resumo da Análise de Variância da Sacarose aparente da cana-de-açúcar com valores de F e sua significância nas três épocas de amostragem

FV	Valores de F		
	Época 2	Época 3	Época 4
VAR	23,83**	8,87**	3,21**
LAM	3,11*	30,62**	0,59 ^{ns}
VAR . LAM	0,63 ^{ns}	1,60 ^{ns}	0,73 ^{ns}
CV (%)	15,74	10,64	10,96
Média Geral (% POL CANA)	8,14	11,10	12,31

NS: não significativo; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade

O valor médio da % POL da CANA, Tabela 3.13, foi de 8,14, 11,10, e 12,31 %, respectivamente para a Época 2, Época 3 e Época 4. Os valores médios encontrados neste experimento, mesmo na época quatro, são inferiores ao considerado ideal por Ripoli e Ripoli (2004), que indicam o teor recomendado de sacarose aparente em cana acima de 14%.

Analisando as variedades, sem separação de lâmina, Tabela 3.13, observa-se que a variedade V6, por se tratar de uma variedade precoce, foi a que apresentou o melhor desempenho em todas as três épocas de amostragem; ao contrário a variedade V8, apresentou os menores teores de sacarose em todas as épocas. O resultado obtido por esta variedade (V8) na última época de amostragem é similar ao resultado de V6 (11,39%) na segunda época.

Com relação às lâminas, Tabela 3.13, observa-se que o déficit hídrico propiciou efeito positivo no teor de sacarose até terceira época de amostragem. Nestas duas primeiras avaliações o resultado obtido por L50 e L75* são estatisticamente superiores ao resultado obtidos por L100. Na quarta época de amostragem não houve diferença significativa entre lâminas, possivelmente em

função do processo natural de maturação da cana-de-açúcar. Barbosa (2015), que conduziu o ciclo da cana planta deste experimento e avaliou quatro diferentes estratégias de maturação não encontrou diferença significativa para a %POL do caldo, ao final do ciclo.

Tabela 3.13 – Teores de sacarose aparente da cana-de-açúcar (% POL da CANA) e teste de médias: (A) das variedades dentro de cada época de amostragem, independentemente de lâmina e (B) lâminas dentro de cada época, independentemente de variedade

(A)				(B)			
Variedade	Época 2	Época 3	Época 4	Lâmina	Época 2	Época 3	Época 4
V1	9,20 b	11,03 b	11,91 b	L 50	8,24 a	11,23 b	12,44 a
V2	9,37 b	11,30 b	13,06 a	L 75	7,80 b	10,72 b	12,14 a
V3	8,46 b	11,42 b	12,02 b	L 100	7,77 b	9,61 c	12,11 a
V4	6,16 d	10,88 b	12,48 a	L 75*	8,75 a	12,82 a	12,53 a
V5	6,55 d	9,91 c	11,56 b	Média (%)	8,14	11,10	12,31
V6	11,39 a	13,03 a	13,35 a				
V7	7,50 c	11,42 b	12,65 a				
V8	6,50 d	9,77 c	11,41 b				
Média (%)	8,14	11,10	12,31				

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

3.3.4. Biomassa Fresca de Colmos (TCH, t ha⁻¹)

A produtividade, em t ha⁻¹, foi estimada considerando-se a soma da biomassa das duas touceiras e a área útil (0,62 m²) ocupada pelo dossel das plantas.

Pela análise de variância, Tabela 3.14, verifica-se que houve diferença altamente significativa ($p < 0,01$) entre as variedades nas épocas um, três e quatro, e na época dois houve diferença ao nível de 5% ($p < 0,05$). Entre as lâminas não houve diferença significativa somente na primeira época de amostragem, demonstrando que o déficit hídrico imposto até este momento não implicou redução da TCH. Houve interação significativa entre variedades e lâminas somente na terceira época de amostragem.

O valor médio da TCH, Tabela 3.14, em cada época de amostragem foi de 12,42, 42,77, 87,46 e 126,21 t ha⁻¹, respectivamente para a Época 1, Época 2, Época 3 e Época 4. O valor médio encontrando na última época de amostragem é

23% inferior à produtividade média de 164,2 t ha⁻¹ encontrada por Barbosa (2015) que conduziu o ciclo da cana planta deste mesmo experimento.

Tabela 3.14 – Resumo da Análise de Variância da Biomassa Fresca de Colmo de cana-de-açúcar com valores de F e sua significância nas quatro épocas de amostragem

FV	Valores de F			
	Época 1	Época 2	Época 3	Época 4
VAR	5,31**	2,93*	23,41**	10,70**
LAM	0,59 ^{ns}	16,15**	97,23**	33,16**
VAR*LAM	0,99 ^{ns}	0,95 ^{ns}	1,83*	1,14 ^{ns}
CV (%)	49,13	26,98	13,53	20,35
Média Geral (t ha ⁻¹)	12,42	42,77	87,46	126,21

NS: não significativo; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade

O estudo das variedades sem diferenciação de lâminas, Tabela 3.15, mostra o desempenho significativamente inferior da variedade V7 em todas as épocas de amostragem. A produtividade média alcançada por V7 (84,82 t ha⁻¹) na quarta época de amostragem é inferior à produtividade alcançada por V2, V3, V4, V5 e V8 ainda na terceira época de amostragem. Destaca-se positivamente a variedade V3 que foi significativamente superior em todas as épocas de amostragem. Outra variedade que merece destaque é a V2 que na primeira época de amostragem posicionava-se como a terceira pior média em TCH e atingiu o segundo melhor desempenho na quarta época.

As diferenças estatísticas encontradas entre as lâminas, Tabela 3.16, indicam que o tratamento L100, sem restrições hídricas, resultou nas maiores produtividades nas épocas três e quatro, demonstrando o efeito do déficit hídrico na variável TCH. Destaca-se o comportamento nos tratamentos L50 e L75*. Verifica-se que, entre as épocas 3 e 4 houve maior incremento de produtividade em L50 do que em L75*, possivelmente em função das plantas já estarem adaptadas ao déficit. Entretanto em função de um desempenho melhor até a época três, a produtividade alcançada ao final do ciclo é maior em L75*. Este comportamento indica adaptabilidade da cultura e também a influencia do déficit no início de cultivo.

Tabela 3.15 – Biomassa Fresca de Colmos (TCH, t ha⁻¹) e teste de médias entre as variedades dentro de cada época de amostragem sem separação de lâminas

Variedade	ÉPOCA 1		ÉPOCA 2		ÉPOCA 3		ÉPOCA 4	
V1	15,76	a	45,09	a	82,61	b	123,83	b
V2	10,68	b	42,15	a	101,33	a	157,89	a
V3	17,51	a	51,66	a	103,48	a	159,23	a
V4	12,16	b	45,49	a	87,88	b	122,00	b
V5	9,67	b	42,85	a	87,29	b	129,72	b
V6	17,00	a	41,18	a	77,72	b	110,16	b
V7	5,80	b	31,25	b	54,94	c	84,82	c
V8	10,75	b	42,48	a	104,40	a	122,05	b
Média	12,42		42,77		87,46		126,21	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

Tabela 3.16 – Biomassa Fresca de Colmos (TCH, t ha⁻¹) e teste de médias entre as lâminas dentro de cada época de amostragem sem separação de variedades

Lâmina	ÉPOCA 1		ÉPOCA 2		ÉPOCA 3		ÉPOCA 4	
L 50	10,99	a	30,09	c	59,28	d	96,70	c
L 75	12,81	a	41,43	b	90,79	b	134,39	b
L 100	12,87	a	47,77	a	117,03	a	164,90	a
L 75*	13,00	a	51,79	a	82,73	c	108,86	c
Média	12,42		42,77		87,46		126,21	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

Os dados de TCH são apresentados por variedade dentro de cada lâmina nas quatro épocas de amostragem nas Figuras 3.21 a 3.24.

A variabilidade dos dados estimados de TCH foi em função da época de amostragem. Na primeira época a variabilidade foi muito alta (CV ~50%, Tabela 3.14), na segunda e terceira épocas reduziu aos 13% e encerrou o ciclo com coeficiente de variação próximo a 20%. A diferença, média entre a máxima e a mínima produtividade dentro da mesma variedade e mesma lâmina foi de 10,31, 17,83, 19,15 e 38,34 t ha⁻¹, respectivamente na época 1, época 2, época 3 e época 4, a combinação V6-L50-Época 4 e V8-L100-Época 4 atingiu diferença superior a 110 t ha⁻¹.

Figura 3.21 – Gráfico Box Plot para a produtividade (TCH) das oito variedades dentro de cada lâmina na primeira época de amostragem

Figura 3.22 – Gráfico Box Plot para a produtividade (TCH) das oito variedades dentro de cada lâmina na segunda época de amostragem

Figura 3.23 – Gráfico Box Plot para a produtividade (TCH) das oito variedades dentro de cada lâmina na terceira época de amostragem

Figura 3.24 – Gráfico Box Plot para a produtividade (TCH) das oito variedades dentro de cada lâmina na quarta época de amostragem

3.3.5. Biomassa Seca da Parte Aérea – BIOM

A variável biomassa seca da parte aérea das plantas representa a somatória da matéria seca de perfilho improdutivo, limbo foliar total, desponte e colmo de cada parcela.

Pela análise de variância, Tabela 3.17, verifica-se que houve diferença altamente significativa entre as variedades nas épocas um, três e quatro, e entre as lâminas não houve diferença significativa somente na primeira época de amostragem, demonstrando que o déficit hídrico imposto até este momento não implicou redução da BIOM. Não houve interação entre lâminas e variedades em nenhuma das épocas de amostragem, por este motivo os resultados estão separados por variedades, independentemente da lâmina e por lâminas independentemente das variedades.

O valor médio da BIOM, Tabela 3.17, em cada época de amostragem foi de 7,83, 24,03, 42,47 e 59,83 t ha⁻¹, respectivamente para a Época 1, Época 2, Época 3 e Época 4. O valor médio de BIOM encontrando na última época de amostragem é ligeiramente superior ao valor médio (57,5 t ha⁻¹) encontrado por Barbosa (2015) que conduziu o ciclo da cana planta deste mesmo experimento.

Tabela 3.17 – Resumo da Análise de Variância da Biomassa seca da parte aérea com valores de F e sua significância nas quatro épocas de amostragem

Fontes de Variação	Época 1	Época 2	Época 3	Época 4
	Valores de F			
VAR	4,07**	1,31 ^{ns}	16,04**	12,95**
LAM	1,12 ^{ns}	23,00**	88,98**	27,01**
VAR . LAM	0,83 ^{ns}	0,56 ^{ns}	1,48 ^{ns}	1,41 ^{ns}
CV (%)	28,07	26,01	12,57	16,45
Média Geral (t ha ⁻¹)	7,83	24,03	42,47	59,82

NS: não significativo; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade

O estudo na escala de lâminas, Tabela 3.18, indica que o tratamento L100 diferenciou significativamente de uma ou mais lâminas nas épocas 2, 3 e 4, não ocorrendo diferença significativa na primeira época de amostragem. A BIOM média encontrada na quarta época de amostragem variou de 47,18 (L50) a 70,84 t ha⁻¹ (L100). Estes valores também coincidem com os valores encontrados por Barbosa

(2015) que obteve, em média, 71,50 e 42,41 t ha⁻¹, respectivamente nas lâminas L100 e L50.

No estudo das variedades observa-se na tabela 3.19, que variedades V2, V3 e V8 destacaram-se das demais nas épocas três e quatro, a produtividade média de BIOM destas variedades foi de 74,57, 70,95 e 65,47 t ha⁻¹, respectivamente para V2, V3 e V8.

Tabela 3.18 – Produtividade de biomassa seca da parte aérea (t ha⁻¹) e teste de médias das lâminas dentro de cada época de amostragem, independentemente de variedade

Lâmina	Época 1	Época 2	Época 3	Época 4
L 50	8,26 a	16,83 d	29,89 d	47,18 c
L 75	7,93 a	21,88 c	45,31 b	65,37 a
L 100	8,00 a	31,17 a	54,52 a	70,84 a
L 75*	7,15 a	26,24 b	40,16 c	55,93 b
Média (t ha ⁻¹)	7,83	24,03	42,47	59,83

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

Tabela 3.19 – Produtividade de biomassa seca da parte aérea (t ha⁻¹) e teste de médias das variedades dentro de cada época de amostragem, independentemente de lâmina

Variedade	Época 1	Época 2	Época 3	Época 4
V1	9,74 a	26,05 a	40,30 c	56,96 b
V2	8,16 a	24,90 a	50,38 a	74,57 a
V3	8,61 a	26,79 a	48,84 a	70,95 a
V4	7,74 a	24,78 a	39,68 c	56,40 b
V5	6,72 b	23,73 a	43,12 b	60,09 b
V6	8,83 a	22,69 a	38,15 c	49,85 c
V7	5,75 b	20,32 a	32,04 d	44,36 c
V8	7,11 b	22,99 a	47,27 a	65,47 a
Média (t ha ⁻¹)	7,83	24,03	42,47	59,83

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

Nas figuras 3.25 e 3.26, os dados de BIOM são apresentados por variedade dentro de cada lâmina nas quatro épocas de amostragem. Como pode ser observado, na primeira época de amostragem a máxima BIOM (11,00 t ha⁻¹) ocorre nas variedades V1 e V6, respectivamente nas lâminas L75 e L50. Comparando a segunda e primeira épocas de amostragem nota-se que a variedade V6 foi a que sofreu mais intensamente com o déficit hídrico, uma vez que o melhor desempenho observado na Época 1, tornou-se o pior na Época 2. Entre este intervalo o ganho de

produtividade de V6 em L50 foi de apenas 2 t ha⁻¹, enquanto que nas demais variedades este ganho foi, em média, 8,5 t ha⁻¹. Entretanto, nas avaliações das épocas 3 e 4 a variedade V6 demonstrou adaptação ao déficit hídrico, uma vez que na quarta época de amostragem sua produtividade em BIOM alcançou o quarto melhor desempenho dentro da lâmina L50. Analisando individualmente todas as variedades dentro de uma mesma lâmina em todas as épocas de amostragem, verifica-se que a variedade V7 foi a que obteve o pior desempenho. Ao final do ciclo (Época 4), sua produtividade BIOM foi de apenas 33,00 t ha⁻¹. Este valor corresponde 26,00 t ha⁻¹ a menos que a produtividade máxima alcançada pela variedade V3 dentro da lâmina L50, porém esta baixa produtividade não foi apenas em função do déficit hídrico, mesmo em L100 a BIOM produzida pela variedade V7 é inferior a produtividade de V3 e V2 em L50.

As variedades V2 e V3 alcançaram, em L100, respectivamente 86 e 96 t ha⁻¹; deste total, aproximadamente 55% corresponde a biomassa de colmos. Na Figura 3.27 encontram-se as porcentagens que cada componente (perfilho improdutivo, bainha, limbo, desponte e colmo) representam na biomassa total. Observa-se que na primeira época de amostragem a maior parte deste montante é proveniente da bainha e do limbo; a partir da segunda época de amostragem já se tem grande influência da matéria seca de colmos na BIOM e, em termos médios a porcentagem proveniente de colmos, nas épocas 2, 3 e 4, é de 53%.

Figura 3.25 – Biomassa seca da parte aérea, t ha⁻¹, nas quatro lâminas dentro de cada variedade nas quatro épocas de amostragem

Figura 3.26 – Biomassa seca da parte aérea, t ha⁻¹, das oito variedades dentro de cada lâmina nas quatro épocas de amostragem

Figura 3.27 – Proporção média dos componentes: perfilho senescente (PM); bainha; folha; desponte e colmo na biomassa seca total da parte aérea das oito variedades, independente de lâmina nas quatro épocas de amostragem

3.3.6. Número de perfilhos vivos por metro quadrado

A avaliação quanto ao número de perfilhos vivos por m² (NPV) foi realizada em sete épocas ao longo do ciclo da cultura (37, 67, 103, 138, 167, 234 e 376 DAC).

Na primeira avaliação, realizada aos 37 DAC, verifica-se que o NPV no tratamento L50 é inferior à quantidade encontrada nas lâminas L75, L100 e L75*, porém, neste período, ainda não tinha iniciado a imposição dos tratamentos de déficit hídrico. Entretanto, estas mesmas parcelas na cana planta, foram submetidas ao mesmo déficit hídrico; desta maneira a umidade residual no final do ciclo anterior pode ter influenciado a brotação inicial. Como verificado na tabela 3.20 há diferença altamente significativa pelo teste F.

Tabela 3.20 – Resumo da Análise de Variância do Número de perfilhos m⁻² com os valores de F e sua significância nas sete datas de avaliação

FV	Valores de F						
	37 DAC	67 DAC	103 DAC	138 DAC	167 DAC	234 DAC	376 DAC
VAR	4,43**	8,10**	12,44**	16,95**	9,14**	6,32**	20,72**
LAM	4,14**	3,63*	4,77**	6,90**	1,87 ^{ns}	9,10**	10,99**
VAR . LAM	0,92 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,91 ^{ns}	1,03 ^{ns}	0,53 ^{ns}	1,34 ^{ns}	1,75*
CV (%)	26,94	20,32	18,11	18,20	22,87	26,50	22,85
Média	57,00	60,00	57,00	55,00	49,00	32,00	11,00

NS: não significativo; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade

Os dados que se encontram nas tabelas 3.20 e 3.21 estão agrupados por lâminas e variedades, pois não ocorreu interação entre variedade em nenhuma das avaliações.

Na tabela 3.21 verifica-se o efeito da lâmina de irrigação no número de perfilhos vivos. Analisando individualmente a lâmina L75* verifica-se claramente este efeito; na primeira avaliação com 37 DAC, que acabara de iniciar a imposição dos tratamentos não houve diferença estatística entre L75* e as lâminas L100 e L75. Nos 30 dias posteriores, as parcelas deste tratamento (L75*) foram submetidas a lâminas com reposição de 125% da ETc. Este aumento do volume de água aplicado proporcionou um aumento no NPV. O NPV permaneceu estatisticamente igual à lâmina L100 até a avaliação realizada aos 167 DAC. Aproximadamente no 156º DAC a irrigação realizada em L75* correspondia a 50% ETc. A imposição deste déficit

refletiu no NPV encontrados na avaliação realizada aos 234 DAC, pois os resultados encontrados em L75* é estaticamente igual aos valores encontrados na lâmina L50.

Quanto às variedades, tabela 3.22, verifica-se que há diferença estatística em todas as avaliações, destaque para a variedade V8 que se manteve estatisticamente superior a uma ou mais variedades em todas as avaliações realizadas.

Tabela 3.21 – Número de perfilhos m^{-2} e teste de médias das lâminas em cada época de amostragem independente de variedades

Lâmina	Número de perfilhos m^{-2}											
	37 DAC	67 DAC	103 DAC	138 DAC	167 DAC	234 DAC	376 DAC					
L50	48 b	56 b	50 b	48 b	45 a	28 b	9 c					
L75	63 a	59 b	58 a	54 a	52 a	34 a	11 b					
L100	61 a	59 b	58 a	58 a	49 a	39 a	13 a					
L75*	58 a	67 a	60 a	60 a	50 a	28 b	11 b					

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

Tabela 3.22 – Número de perfilhos m^{-2} e teste de médias das variedades em cada época de amostragem independente de lâminas

Variedade	Número de perfilhos m^{-2}											
	37 DAC	67 DAC	103 DAC	138 DAC	167 DAC	234 DAC	376 DAC					
V1	59 a	60 b	53 b	49 b	41 c	25 b	10 c					
V2	64 a	62 b	56 b	52 b	49 b	35 a	16 a					
V3	45 b	45 c	45 c	42 b	40 c	25 b	10 c					
V4	70 a	71 a	69 a	74 a	64 a	39 a	11 c					
V5	48 b	52 c	49 c	46 b	45 b	33 a	12 b					
V6	65 a	68 a	66 a	64 a	51 b	37 a	7 d					
V7	47 b	52 c	46 c	45 b	40 c	26 b	7 d					
V8	61 a	72 a	71 a	68 a	63 a	39 a	15 a					

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

O número máximo de perfilhos vivos, Figura 3.28, ocorreu entre 37 e 67 DAC. Os valores alcançados em L100, variaram de 45 (V7) a 88 perfilhos m^{-2} (V4), mantendo-se constante ou com pouca redução até o 154° DAC. Após este período nota-se forte diminuição no NPV, atingindo o menor número aos 376 DAC. Nesta última avaliação o NPV variou em L100, de oito (V7) a 20 perfilhos m^{-2} (V8).

Figura 3.28 – Número de perfilhos vivos por m² em função das variedades, das lâminas e das épocas de avaliação, (A) V1, V2, V3 e V4; (B) V5, V6, V7 e V8

3.3.7. Número de folhas verdes e Folhas secas

O número de folhas verdes (NFV) e o número de folhas secas (NFS) de cada variedade no tratamento L100 ao longo do ciclo encontram-se, respectivamente na Figura 3.29 e na Tabela 3.23.

Na primeira avaliação, realizada aos 37 DAC, o NFV variou entre quatro e cinco; nesta mesma avaliação ainda não tinha ocorrido senescência foliar. Entre as avaliações realizadas nos 67 e 205 DAC, o NFV permaneceu praticamente constante variando entre seis e nove folhas verdes totalmente expandidas. Com exceção das variedades V2 e V7 há um ligeiro aumento no NFV entre os dias 205 e 287 DAC. Este aumento, possivelmente ocorreu pela elevação da temperatura média do ar, Figura 3.30. Como o aparecimento de folhas é regulado pelo acúmulo de graus dias, quanto mais elevada (dentro dos limites) a temperatura média, mais rápido (em dias) será o surgimento de uma nova folha.

Até os 287 DAC a relação entre o NFV e NFS é próximo de 1, porém na última avaliação (376 DAC) há um forte aumento no NFS, devido ao processo de maturação natural da cana-de-açúcar.

Com exceção das variedades V8 e V6, o NFV ao final deste ciclo é semelhante aos valores encontrados por Barbosa (2015) que conduziu o ciclo da cana planta deste mesmo experimento. Suguitani (2006) e Nassif (2010) encontraram valores máximos de folhas verdes entre sete e nove, valores que também coincidem com a maioria dos encontrados neste experimento.

Figura 3.29 – Número de folhas verdes (NFV) presentes nos colmos das oito variedades submetidas ao tratamento L100 em diferentes dias após a colheita

Figura 3.30 – Temperatura média do ar no interior da casa de vegetação ao longo do ciclo

Tabela 3.23 – Número de Folhas secas em Função dos Dias após a Colheita (DAC) e das diferentes variedades submetidas ao tratamento L100 em diferentes dias após a colheita

DAC	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
37	0	0	0	0	0	0	0	0
67	2	1	1	2	1	2	2	1
103	4	3	3	2	2	3	2	1
104	4	3	3	2	2	3	3	1
138	5	5	5	3	4	5	5	3
167	7	5	6	4	4	7	6	3
205	6	6	7	6	5	6	7	6
234	10	7	8	5	4	7	7	6
287	10	10	11	10	10	10	11	8
376	17	22	19	18	18	21	19	18

3.3.8. Altura de Colmos

A altura de colmos foi mensurada aos 37, 67, 103, 138, 167, 234 e 376 DAC após a colheita da cana planta.

Como esperado, Figura 3.31, a altura máxima de colmos ocorreu na última avaliação (376 DAC). Observa-se nesta mesma Figura que entre os dias 138 e 167 a altura de colmo pouco variou. Isto ocorreu devido às temperaturas mais amenas entre o final de junho e início de agosto.

Figura 3.31 – Altura média de colmos, em metros, ao longo do ciclo das variedades: (A) V1, V2, V3 e V4; (B) V5, V6, V7 e V8 submetidas ao tratamento L100

A análise de variância da altura de colmos, Tabela 3.24, indica que na primeira avaliação (37 DAC) não houve diferença significativa entre variedades e também entre lâminas. Neste momento ainda se iniciava a imposição dos tratamentos com níveis de irrigação. Mesmo na avaliação aos 67 DAC ainda não foi detectado efeito das lâminas na altura das plantas, porém, a partir da terceira avaliação (103 DAC) houve diferença altamente significativa ($p < 0,01$) entre as lâminas. Com relação às variedades nota-se que na segunda avaliação (67 DAC) houve diferença significativa ($p < 0,05$) e altamente significativa nas avaliações realizadas aos 103 e 138 DAC. Entretanto, na avaliação realizada aos 167 DAC não houve diferença significativa, isto possivelmente ocorreu devido às diferenças de temperatura basal para o alongamento dos colmos, uma vez que as variedades V1, V5 e V8, que se apresentavam estaticamente inferior na avaliação realizada aos 138 DAC, mantiveram a taxa de crescimento enquanto que a variedade V6, com a maior altura até os 138 DAC, apresentou drástica redução.

Tabela 3.24 – Resumo da Análise de Variância da Altura de Plantas de cana-de-açúcar com valores de F e sua significância nas sete datas de avaliação

FV	Valores de F						
	37 DAC	67 DAC	103 DAC	138 DAC	167 DAC	234 DAC	376 DAC
VAR	0,73 ^{ns}	2,40*	3,65**	3,16**	1,93 ^{ns}	4,05**	19,81**
LAM	1,05 ^{ns}	0,78 ^{ns}	8,70**	14,14**	11,77**	6,99**	19,68**
VAR . LAM	0,37 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,73 ^{ns}	0,95 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,83 ^{ns}
CV (%)	32,51	31,97	22,84	22,43	23,26	18,00	12,41
Média Geral (m)	0,16	0,35	0,57	0,78	0,86	1,35	2,13

NS: não significativo; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade

Analisado as variedades, independente de lâminas, Tabela 3.25, verifica-se que a variedade V6, com exceção da avaliação aos 167 DAC, foi a que alcançou a maior altura. Nota-se que a altura média desta variedade aos 234 DAC é próxima da altura alcançada por V7 na última avaliação.

Entre 234 DAC e 376 DAC houve um crescimento médio de 0,77 m, este valor indica que ocorreu em média uma taxa de crescimento de 0,005 m dia⁻¹. Valor próximo ao encontrado por Ramesh (2000) que, estudando cultivares de cana-de-açúcar na Índia, encontrou uma taxa de 0,0057 m dia⁻¹ entre 240 a 360 DAP.

Tabela 3.25 – Altura média de plantas das oito variedades, independente de lâmina nas sete datas de avaliação

Altura de Plantas (m)													
Variedade	37 DAC		67 DAC		103 DAC		138 DAC		167 DAC		234 DAC		376 DAC
V1	0,17	a	0,35	a	0,62	a	0,76	b	0,92	a	1,36	b	2,26 b
V2	0,17	a	0,39	a	0,57	a	0,79	b	0,88	a	1,29	b	2,11 c
V3	0,15	a	0,38	a	0,66	a	0,92	a	1,00	a	1,51	a	2,38 b
V4	0,16	a	0,30	b	0,49	b	0,78	b	0,79	a	1,30	b	2,06 c
V5	0,17	a	0,38	a	0,60	a	0,71	b	0,84	a	1,32	b	1,99 c
V6	0,16	a	0,41	a	0,63	a	0,89	a	0,92	a	1,60	a	2,76 a
V7	0,16	a	0,28	b	0,47	b	0,72	b	0,77	a	1,14	b	1,65 d
V8	0,13	a	0,30	b	0,51	b	0,66	b	0,78	a	1,32	b	1,84 d
Média (m)	0,16		0,35		0,57		0,78		0,86		1,36		2,13

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

Com relação às lâminas, independente de variedades, observa-se, Tabela 3.26, que o desempenho alcançado pelas variedades no tratamento L100 foi estatisticamente superior a uma ou mais lâminas a partir da avaliação do 103° DAC. Destaca-se os resultados encontrados na lâmina L75*, em que o desempenho neste tratamento reforça o efeito do déficit no crescimento da planta. Nas avaliações realizadas até os 167 DAC altura alcançada em L75* era, em termos numéricos, praticamente igual ao alcançado por L100. Na avaliação realizada aos 234 DAC seu desempenho assemelha-se ao encontrado no tratamento L75. Já na última avaliação a altura em L75* está estatisticamente igual a alcançada no tratamento L50.

Tabela 3.26 – Altura média de plantas na quatro lâminas, independente de variedade nas sete datas de avaliação

Altura de Plantas (m)								
Variedade	37 DAC		67 DAC		103 DAC		167 DAC	
L50	0,17	a	0,35	a	0,46	b	0,61	c
L75	0,15	a	0,33	a	0,55	a	0,74	b
L100	0,17	a	0,34	a	0,63	a	0,87	a
L75*	0,15	a	0,38	a	0,62	a	0,90	a
Média (m)	0,16		0,35		0,57		0,78	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

3.3.9. Número, comprimento e diâmetro de entrenós

A contagem do número de entrenós (NN) e as medidas do comprimento e diâmetros dos entrenós foram realizadas aos 376 DAC.

Nos resultados da análise de variância, Tabela 3.27, observa-se que houve diferença altamente significativa entre variedades para todas as variáveis. Entre lâminas houve diferença altamente significativa ($p < 0,01$) nas variáveis número e comprimento de entrenós e diferença significativa ($p < 0,05$) para diâmetro de entrenó. Não houve interação entre variedade e lâmina em nenhuma das variáveis, por este motivo não realizou o desdobramento.

Tabela 3.27 – Resumo da Análise de Variância do Número, Comprimento e diâmetro com valores de F e sua significância

FV	Valores de F		
	Número de Entrenó	Comprimento do Entrenó	Diâmetro do Entrenó
VAR	31,56**	15,85**	11,52**
LAM	8,43**	14,92**	3,74*
VAR . LAM	0,74 ^{ns}	1,46 ^{ns}	1,34 ^{ns}
CV (%) =	7,68	9,27	7,69
Média	22,00	9,70 (cm)	0,24 (cm)

NS: não significativo; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade

A média do número de entrenó, desconsiderando a diferenciação de lâminas, Tabela 3.28, variou de 28 (V6) a 18 entrenós (V5). No estudo das lâminas verifica-se que ocorreu diferença significativa pelo teste Scott-Knott, Tabela 3.29, porém a variação entre o máximo e o mínimo foi inferir a três “entrenós”. Machado et al. (2009) encontrou, aos 318 DAP, 20 e 24 entrenós nas variedades IACSP 94-2094 e IACSP 96-2042.

Com relação ao diâmetro de entrenós verifica-se na Tabela 3.28 que houve diferença significativa, pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, entre variedades. O diâmetro médio variou de 2,72 a 2,21 cm, alcançando estes valores as variedades V3 e V2, respectivamente. Por se tratar de um teste que realiza agrupamentos de tratamentos, nota-se que há formação de três grupos de variedades (V3 e V7; V4 e V5; V1, V2, V6 e V8). Entre as lâminas, somente L50 obteve desempenho significativamente inferior às demais.

Quanto ao comprimento médio de entrenós, observa-se na tabela 3.28, que houve diferença significativa, pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, entre variedades, com destaque para as variedades V1, V3 e V5 que tiveram, em média respectivamente, 10,71, 10,72, e 10,84 cm de comprimento de entrenó, quanto às lâminas, sem distinção de variedades, Tabela 3.29. Destaca-se o tratamento L100 que alcançou comprimento médio estaticamente superior as demais lâminas.

Tabela 3.28 – Número, comprimento e diâmetro de Entrenós e teste de médias das variedades independente de lâminas

Variedade	Número de Entrenós	Comprimento de Entrenó (cm)	Diâmetro de Entrenó (cm)
V1	21,00 c	10,71 a	2,41 c
V2	22,00 b	9,59 c	2,21 c
V3	22,00 b	10,72 a	2,72 a
V4	22,00 b	9,25 c	2,59 b
V5	18,00 d	10,84 a	2,50 b
V6	28,00 a	9,87 b	2,28 c
V7	20,00 c	8,02 d	2,65 a
V8	21,00 c	8,67 d	2,32 c
Média	22,00	9,35	2,44

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

Tabela 3.29 – Número, comprimento e diâmetro de Entrenós e teste de médias das lâminas independente de variedades

Lâmina	Número de Entrenós	Comprimento de Entrenó (cm)	Diâmetro de Entrenó (cm)
L50	20,70 c	9,19 c	2,36 b
L75	23,30 a	10,02 b	2,45 a
L100	23,00 a	10,56 a	2,50 a
L125	21,70 b	9,06 c	2,52 a
Média	22,00	9,71	2,46

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott

Dentro do estudo sobre comprimento de entrenós, plotou-se o comprimento em função de cada entrenó (Figuras 3.32, 3.33 e 3.34).

Observa-se na figura 3.32 que até aproximadamente o 10^o e 15^o entrenó o comprimento manteve-se em um patamar com posterior aumento do comprimento nos entrenós seguintes, com exceção da variedade V3 que nos primeiros entrenós (1 a 7 entrenós) atingiu seu máximo comprimento (12,2 cm), em seguida reduziu a

9,1cm e novamente aumentou chegando a 11,80 cm no 17º entrenó. Em todas as variedades o comprimento mínimo ocorreu entre os 10 primeiros entrenós, e o máximo entre o 15º e 19º entrenós, exceto nas variedades V3, V4 e V6 que atingiram o máximo comprimento nos entrenós 4, 25 e 23, respectivamente. Com relação ao comprimento, considerando apenas a lâmina L100 (Figura 3.33), verifica-se que de maneira geral o comprimento dos entrenós é maior que o comprimento médio (todas lâminas) principalmente entre os entrenós de número 10 e 17, exceção para as variedades V6 que apresentou ligeira redução nesta mesma faixa.

Quanto às lâminas, sem distinção de variedades, Figura 3.34, observa-se que no tratamento L50 o comprimento manteve-se menor que os demais em praticamente todos os entrenós. No tratamento L75* nota-se que os primeiros entrenós tinham comprimentos similares ou superiores aos comprimentos do tratamento L100, decaindo em seguida para valores próximos a lâmina L50. Este comportamento demonstra a influencia do déficit no comprimento de entrenós uma vez que no tratamento L75* a lâminas reduziu de 125% ETc para 50% Etc.

Figura 3.32 – Comprimento médio de cada entrenó em função das oito variedades, independentemente de lâminas

Figura 3.33 – Comprimento médio de cada entrenó das oito variedades submetidas à lâmina L100

Figura 3.34 – Comprimento médio de cada entrenó nas quatro lâminas de irrigação independente de variedades

3.4. Conclusões

- Equações que correlacionam área de folhas com sua respectiva massa estimam adequadamente a área foliar total;
- Os déficits hídricos implantados ocasionaram redução do IAF desde os 100 DAC (primeira época de amostragem);
- Na colheita final (12 meses) não há diferença entre as lâminas de irrigação quanto a %POL;
- A produtividade de massa fresca de colmo é influenciado pela lâmina de irrigação já na segunda época de amostragem (~205 DAC), neste ponto há redução de 35% entre L100 e L50.
- A lâmina de irrigação L50 provocou redução significativa na altura de plantas a partir dos 103 DAC, entretanto a altura final foi estatisticamente igual à altura atingida na lâmina L75* que caracterizou por déficit hídrico mais ao final do ciclo.

Referências

BARBOSA, F. S. **Produtividade de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento: Interações entre variedades, lâminas e intensidade do déficit hídrico na fase de maturação**. 2015. 168p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

BARROS, A. C. **Utilização do modelo CANEGRO para estimativa da produtividade de cana-de-açúcar irrigada em diferentes regiões do Brasil**. 2011. 118 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2011.

CONSECANA (CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Manual de instruções**. 5. ed. Piracicaba, 112 p., 2006.

FARIA, L.A. **Proposta de norma técnica de ensaio para tubogotejadores de irrigação: resistência ao entupimento por particulados sólidos em suspensão**. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

FARIAS, C. H. A.; DANTAS NETO, J.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R. Índice de área foliar em cana-de-açúcar sob diferentes níveis de irrigação e zinco na Paraíba. **Caatinga**, v.20, n.7, p.45-55, 2007.

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.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciênc. agrotec.** Lavras, v.35, n.6, p. 1039-1042, nov-dez 2011.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de- -açúcar. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.17, n.5, p.32-34, 1999.

IAC (INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS). Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/produtoseseservicos/analisedosolo/interpretacaoanalise.php>>. Acesso em: 15 de fevereiro 2015

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

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

JONES, M.; PORTER, C.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; SINGELS, A.; SHINE, J.; NAYAMUTH, R.; KINGSTON, G.; CHINORUMBA, S.; VAN DEN BERG, M. Incorporating the DSSAT/CANEGRO sugarcane model into the DSSAT V4 crop modelling system. In: XXVI ISSCT Congresses., 26, 2007. Durban. **Proceedings international society sugar cane technology**: Durban : ISSCT, 2007.

LAVANHOLI, M. G. D. P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e álcool. In: Dinardo-Miranda , L. L.; Vasconcellos, A. C. M. de; Landell, M. G. A. (Org.). **Cana-de-açúcar**. Campinas/SP: IAC, 2008, chap. 32, p. 697-722

LEAL, D.P.V. **Evapotranspiração da cana-de-açúcar e fotossíntese acumulada em biomassa e energia, para diferentes variedades, disponibilidades hídricas no solo e ciclos de cultivos**. 2012. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao deficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 1575-1582, 2009.

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 168), 29p., 2012.

MARIN, F. R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos**. 2014. 262p. Livre Docência. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 2014.

MARIN, F.R.; THORNBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; REZENDE, R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. Evaluation of APSIM-SUGAR and DSSAT-CANEGRO for a widely grown Brazilian sugarcane cultivar. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 28., 2013.São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2013.

MARIN, F. R.; SUGUITANI, C.; DONZELLI, J. L.; PALLONE, W. J.; NASSIF, D. S. P.; SAKAI, R. H.; POLZER, D. L.; VIANA, M. S. Avaliação do modelo CANEGRO/DSSAT para quatro cultivares de cana-de-açúcar. 2009. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16, 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Viçosa, MG: UFV; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.

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 production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v.103, p.100-110, 2011.

MONTEIRO, J. E. B. A.; SENTELHAS, P. C.; CHIAVEGATO, C. G.; SANTIAGO, C. V.; PRELA, A. Estimação da área foliar do algodoeiro por meio das dimensões e massa das folhas. **Bragantia**, v.64, n.1, p.15-24, 2005.

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

NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; PALLONE FILHO, W. J.; RESENDE, R. S.; PELLEGRINO, G. Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesq. Agrop. Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 311–318, 2012.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 185, p. 249-258, 2000.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. 2ª ed. Piracicaba: T.C.C. Ripoli, 2007. 198 p.

ROBERTSON, M. J.; BONNETT, G. D.; HUGHES, R. M.; MUCHOW, R. C.; CAMPBELL, J. A. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v.25, n. 7, p. 819-828, dec. 1998.

SANDHU, H. S.; GILBERT, R. A.; MCCRAY, J. M.; PERDOMO, R.; EILAND, B.; POWELL, G.; MONTES, G. Relationships among Leaf Area Index, Visual Growth Rating, and Sugarcane Yield. **Journal American Society of Sugar Cane Technologists**, Baton Rouge, v.32, p.1-14. 2012

SAN JOSÉ, J. J.; MEDINA, E. Análisis de la productividad de caña de azúcar. I. Crecimiento, desarrollo de la superficie foliar y contenido de clorofila de caña de azúcar 'PR 980'. **Turrialba**, v.20, n.2, p.143-8, 1970.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Anatomia e botânica. In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcellos, A. C. M. de; Landell, M. G. A. (Org.). **Cana-de-açúcar**. Campinas/SP: IAC, 2008, cap. 2, p. 47-56.

SILVA, T. G. F. **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco**. 2009. 194p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

SIMÕES, W. L.; GUIMARÃES, M. J. M.; PINHEIRO, M. P. M. A.; LIMA, J. A.; AGUIAR, M. S.; SOUZA, M. A. Fator de forma para estimativa de área foliar de variedades de cana-de-açúcar irrigada no submédio São Francisco. In: 23º Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem – CONIRD, 23, 2013. Luís Eduardo Magalhães. **Anais...** Luís Eduardo Magalhães - Bahia, 2013.

SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE JÚNIOR, J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, n. 2–3, p. 171-178, aug. 2004.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. **DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module**: scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling, South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosicas**. 2006. 60 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

van GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

VARELA, A.C.G., **Análise do comportamento morfofisiológico da cana-de-açúcar irrigada, variedades SP 791011 e SP 716949, nos tabuleiros costeiros paraibanos.** 89p. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2002.

WAHID, A. Analysis of toxic and osmotic effects of sodium chloride on leaf growth and economic yield of sugarcane. **Botanical Bulletin of Academia Sinica**, v.45, p.133-141, 2004.

WATSON, D. J. Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. **Annals of Botany**, Oxford, v. 11, n. 1, p. 41-76, jan.1947.

YOON, C. N. Growth studies on sugarcane: I. Dry matter production. **The Malaysian Agricultural Journal**, v.48, n.2, p. 47-59, 1971.

4 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO MODELO CANEGRO/DSSAT PARA DIFERENTES VARIEDADES BRASILEIRAS

Resumo

Frente ao grande número de variedades brasileiras de cana-de-açúcar e importância da determinação de parâmetros medidos ou mesmo estimados objetivou-se nos estudos relatados neste capítulo realizar a mensuração de parâmetros do modelo CANEGRO bem como posterior parametrização para sete variedades brasileira de cana-de-açúcar e para a variedade padrão do modelo (NCo 376). O experimento foi conduzido em casa de vegetação, pertencente à área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' (ESALQ/USP) localizada em Piracicaba – SP, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 22° 42' 32" S, longitude 47° 37' 45" W e altitude de 546 m. Durante toda a condução do experimento as plantas foram adequadamente irrigadas, com reposição de 100% da ET_c, via gotejamento com frequência de 2 a 3 dias através do monitoramento da umidade do solo via tensiômetro instalado em três diferentes profundidades. Dos 20 parâmetros de cultivares, 11 (LFMAX, MXLFAREA, MXLFARNO, PI1, PI2, PSWITCH, MAX_POP, POPTT16, TTRATNEM, CHUPIBASE e TT_POPGROWTH) são derivados de observações experimentais realizadas na casa de vegetação, os nove demais parâmetros (PARCEmax, APFMX, STKPFMAX, SUCA, TBFT, Tthalf, Tbase, TTPLNTEM, LG_AMBASE) foram parametrizados ou manteve-se os valores padrões do modelo CANEGRO/DSSAT. Todos os parâmetros foram ajustados em função dos limites encontrados nas mensurações ou baseado em limites publicados. A parametrização foi realizada manualmente seguindo-se as recomendações dos pesquisadores Matthew Jones e Abraham Singels. Os parâmetros medidos apresentaram grande diferença em relação aos valores padrão do CANEGRO/DSSAT. O aumento em 2°C na temperatura base resultou em aproximadamente 20°Cd de redução no filocrono. O aumento em 15% do PARCEmax resultou em melhor ajuste das curvas de produtividade.

Palavras Chave: Modelagem, Parametrização, Parâmetros de cultivares, Cana-de-açúcar

Abstract

With the large number of Brazilian varieties of sugarcane and importance of determining the parameters measured or estimated objective of the studies reported in this chapter perform the measurement CANEGRO model parameters and subsequent parameterization for seven sugarcane Brazilian varieties and a variety of standard model (NCO 376). The basic experiment was conducted at the experimental area of the Department of Biosystems Engineering (LEB) of the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ / USP) located in Piracicaba - SP., Throughout the experiment the plants were properly irrigated, with replacement of 100% of ET_c, via drip with frequency of 2 to 3 days by monitoring soil moisture via tensiometer installed in three different depths. 11 of the 20 parameters cultivars (LFmax, MXLFAREA, MXLFARNO, PL1, PL2, PSWITCH, MAX_POP, POPTT16,

TTRATNEM, CHUIBASE and TT_POPGROWTH) are derived from experimental observations in the greenhouse, the nine other parameters (PARCEmax, APFMX, STKPFMAX, JUNK, TBFT, Tthalf, TBase, TTPLNTEM, LG_AMBASE) were parameterized or remained the default values of CANEGRO / DSSAT model. All parameters were adjusted according to the limits found in measurements or based on published limits. The parameterization was performed manually by following the recommendations of researchers Matthew Jones and Abraham Singels. The measured parameters showed big difference in relation to standard values CANEGRO / DSSAT. The increase in the base 2° C temperature resulted in approximately 20 ° Cd reduction in phyllochron. The increase of 15% at PARCEmax resulted in better productivity curves.

Keywords: Modeling, Parameterization, Cultivar parameters, Sugarcane

4.1. Introdução

A melhoria da qualidade e da acessibilidade das diversas ferramentas computacionais vem impulsionando a utilização de softwares no setor agrícola. Correção e adubação de solos, plantios e colheitas já são, em alguns locais, realizadas de acordo com as características de pequenas glebas, entretanto o uso de ferramentas que estudam as potencialidades e o comportamento das culturas nos diversos ambientes de produção ainda é pouco realizado no Brasil. Uma destas ferramentas é o emprego da modelagem agrícola através dos modelos de simulação de crescimento. Pesquisas realizadas por Marin et al., (2009, 2011, 2012, 2013a, 2013b, 2015), Nassif et al., (2012) e Barros (2010) já demonstraram a aplicabilidade no auxílio à definição de variedades e regiões a serem implantados em novos plantios.

A modelagem matemática consiste no uso de equações ou conjuntos destas que representam o comportamento de um sistema, simulando o crescimento dos seus componentes, como folhas, raízes, caules e grãos (OTENG-DARKO et al., 2013).

Em cana-de-açúcar apesar de existir vários modelos, apenas dois estão efetivamente disponíveis para usuários finais (Marin, 2014). Um destes modelos é o CANEGRO/DSSAT. O desenvolvimento deste modelo tinha como principal motivo modelar os processos fisiológicos mais relevantes para a indústria de açúcar Sul-Africana de uma forma mecanicista e para estabelecer uma base para a inclusão de outros processos que poderiam tornar-se importante para a indústria (INMAN-

BAMBER, 2000). Por se tratar de um modelo, primariamente, desenvolvido para as condições e variedades sul-africanas vem sendo utilizado em diversas regiões do mundo, entretanto sua utilização com novas variedades em diferentes locais é mais consistente após adaptações que levam em considerado o solo, clima e as características genéticas das variedades (NASSIF, 2010).

Frente ao grande número de variedades brasileiras de cana-de-açúcar e importância da determinação de parâmetros, medidos ou mesmo estimado objetivou-se nos estudos relatados neste capítulo realizar a mensuração de parâmetros do modelo CANEGRO bem como posterior parametrização para sete variedades brasileira de cana-de-açúcar e para a variedade padrão do modelo (NCo 376).

4.2. Material e métodos

4.2.1. Caracterização da Área Experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, pertencente à área experimental do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' (ESALQ/USP) localizada em Piracicaba – SP, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 22° 42' 32" S, longitude 47° 37' 45" W e altitude de 546 m.

Conforme a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, isto é, subtropical úmido, com três meses mais secos (junho, julho e agosto), caracterizado por chuvas no verão e seca no inverno. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C e a do mês mais frio, inferior a 18°C.

A casa de vegetação, Figura 4.1, é composta por três vãos conjugados, com área total de 400 m² e altura do pé-direito de 5,2 m, cobertura plástica e laterais fechadas com tela "sombrite" preta, com aproximadamente 50% de interceptação da radiação global. A estrutura é provida de um total de 396 vasos (0,333 m³ vaso⁻¹) assentados sobre base de concreto, além de uma estufa de apoio (110 m²), que foi utilizada para abrigar os quadros de comandos do sistema de irrigação, conjuntos moto-bombas, sistemas de aquisição de dados (dataloggers), servindo, também, de apoio na realização das análises de crescimento, preparo e armazenamento dos materiais coletados.

Figura 4.1 - Vista externa (A) e interna (B) da casa de vegetação; ao fundo a estufa de apoio.

4.2.2. Caracterização química e físico-hídrica dos solos

Após o processo de enchimento das parcelas e previamente ao plantio foram coletadas amostras deformadas para a realização de análises químicas e granulométricas. Após a colheita da cana planta realizou-se também coleta de amostra de solo para análises químicas. Os resultados das análises após a colheita da cana planta e sua respectiva interpretação para macronutrientes são apresentados na Tabela 4.1 e para micronutrientes na Tabela 4.2. Com base nesta interpretação foi calculada a adubação e calagem.

Tabela 4.1 – Análise química do solo para macronutrientes em três diferentes camadas

Camada	pH	M.O.	P-resina	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S.B.	CTC	S. bases	Sat. Al	S- SO ₄
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³								V%	m%	mg dm ⁻³
0 - 20	5,8 d	17,8	24,7 c	0,4 a	25,0 d	5,6 c	17,6	0,0	31,3	48,9	63,75	0,0	26,6 d
20 - 40	5,9 d	18,6	21,0 c	0,3 a	23,5 d	7,9 c	17,7	0,0	31,7	49,5	64,25	0,0	37,5 d
40 - 60	5,8 d	19,1	19,0 c	0,3 a	21,2 d	8,4 d	17,7	0,0	29,6	47,4	62,38	0,0	36,9 d

Potencial hidrogeniônico (pH); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P-resina); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); hidrogênio + alumínio (H+Al); soma de bases (S.B.); capacidade de troca catiônica (CTC); enxofre (S) na forma de sulfato (S-SO₄). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos. IAC (2014); Raij et al. (1997).

Tabela 4.2 – Análise Química do solo para micronutrientes em três diferentes camadas

Camada	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	DTPA				(água quente)
	mg dm ⁻³				
0 - 20	0,59 c	22,60 d	1,80 d	2,60 c	0,48 c
20 - 40	0,58 c	23,60 d	1,91 d	2,80 c	0,53 c
40 - 60	0,59 c	26,70 d	1,88 d	3,02 c	0,49 c

Cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos, segundo IAC (2014), Raij et al. (1997)

A caracterização físico-hídrica do solo foi realizada a fim de obter-se a curva de retenção da água no solo, para tanto amostras indeformadas foram coletadas através de trado para amostra indeformada com cilindros de aço inox de 50 cm³. As amostras foram retiradas em três profundidades, 0,10, 0,30 e 0,50 m, representando as camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente.

A determinação das curvas de retenção de água no solo se deu através de mesa de tensão à mesa de tensão (tensões de 1, 2, 4 e 6 kPa) e extratores de “Richards” com placas porosas (10, 30, 50, 100, 500, 1000 e 1500 kPa). Determinou-se ainda a densidade do solo (D_s), densidade das partículas do solo (D_p), porosidade total (PT), bem como a umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

Conforme descrito por Barbosa (2015) no primeiro ciclo (cana-planta) devido à falta de estrutura estável/“definitiva” do solo no início do cultivo optou-se por utilizar uma caracterização físico-hídrica realizada em um experimento anterior, feito pelo mesmo grupo e linha de pesquisa, utilizando este mesmo solo e mesma metodologia de enchimento dos vasos, quando de posse dos resultados e a semelhança entre outros valores optou-se caracterização feita por Chaves (2008). Neste experimento devido à necessidade de comparação entre os ciclos da cana planta e cana soca em outras teses/dissertações optou por utilizar os mesmos parâmetros conforme Tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 – Caracterização físico-hídrica do solo

Camada (m)	θ_{cc}	θ_{pmp}	CAD (mm)	D_s	D_p	PT (%)	Frações granulométricas		
	$cm^3.cm^{-3}$			$g.cm^{-3}$			Areia	Silte	Argila
							%		
0,00 – 0,20	0,227	0,106	24,2	1,53	2,65	42,3	75,1	7,8	17,1
0,20 – 0,40	0,226	0,098	25,6	1,50	2,65	43,4	74,5	8,0	17,5
0,40 – 0,60	0,241	0,132	21,8	1,69	2,64	36,0	74,4	8,6	17,0

θ_{cc} : umidade na capacidade de campo (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de 4,85 kPa). θ_{pmp} : umidade no ponto de murcha permanente (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de 1500 kPa). CAD: capacidade de água disponível. D_s : densidade do solo. D_p : densidade de partículas do solo. PT: porosidade total do solo. Adaptado de Chaves (2008)

Tabela 4.4. Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten (1980).

Camada (m)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α (kPa ⁻¹)	m	n
0,00 – 0,20	0,421	0,098	1,3464	0,1799	2,7175
0,20 – 0,40	0,412	0,085	1,5708	0,1648	2,5028
0,40 – 0,60	0,374	0,122	1,1291	0,2749	1,5619

Adaptado de Chaves (2008)

4.2.3. Sistema / Manejo da irrigação e fertirrigação

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, utilizando tubo gotejador com emissor autocompensante, anti-sifão e antidrenante. Cada parcela experimental foi controlada individualmente, sendo instalada uma linha de gotejo com cinco emissores espaçados em 0,20 m e com vazão de 1,6 L h⁻¹ em cada uma das 396 parcelas. Desta maneira utilizou-se aproximadamente 1,0 m de tubo gotejador em cada parcela, somando uma vazão de 8 L h⁻¹ por parcela e totalizando aproximadamente 3,2 m³ h⁻¹ para todas as parcelas.

O manejo da irrigação foi realizado por meio do monitoramento da tensão da água no solo, utilizando-se tensiômetros com transdutores de vácuo. Os tensiômetros foram instalados imediatamente após o transplântio das mudas em três repetições das oito variedades a três profundidades: 0,10 m (representando a camada de 0,0 a 0,20 m), a 0,30 m (representando a camada de 0,20 a 0,40 m) e 0,50 m (representando a camada de 0,50 a 0,60 m).

As leituras dos tensiômetros foram realizadas automaticamente através de um sistema de aquisição e armazenamento de dados.

Os dados coletados foram inicialmente transformados em potencial matricial da água no solo (ψ_m), descontando-se a pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro para cada profundidade medida. A pressão equivalente descontada foi de 3,0, 5,0 e 7,0 kPa para os tensiômetros que representam as camadas de 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente.

Após obter os dados do potencial matricial da água no solo (ψ_m) foi calculada a média entre as leituras dos três blocos, obtendo uma leitura para cada camada em cada variedade (24 valores de ψ_m). Com estes valores, foi estimada a umidade (θ), em cm³ cm⁻³, através do modelo proposto por Van Genuchten (1980), que relaciona os valores de ψ_m com os respectivos valores de θ .

Assim, com os dados de umidade estimados acima e a caracterização físico-hídrica do solo de cada camada, foram calculadas as lâminas de irrigação necessárias para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo (θ_{cc}) para cada variedade. A somatória das lâminas necessárias de cada camada resultou na lâmina de irrigação a ser aplicada para cada variedade.

Os cálculos do manejo foi realizado em uma planilha preparada no Software Microsoft Excel®, sendo o último passo o cálculo do tempo de irrigação necessário para cada variedade. Para o cálculo do tempo de irrigação, adotou-se a vazão do sistema de 8 L h⁻¹ para cada parcela e a área de solo da parcela de 0,43 m².

Durante todo o ciclo realizou-se um total de 149 irrigações em uma frequência de dois a três dias. Nas primeiras 10 irrigações não houve diferenciação entre variedades, aplicou-se uma lâmina fixa enquanto adequava o sistema automático de coleta de dados da tensão de água no solo.

A lâmina de irrigação acumulada, apresentada na Figura 4.2, mostra que ao final do ciclo há uma divisão de três grupos, o primeiro composto pelas variedades V2 e V3 com consumo hídrico de aproximadamente 2920 mm, o segundo grupo (V1, V4, V5 e V8) com demanda entre 2350 e 2450 mm e o terceiro grupo (V6 e V7) com, aproximadamente 1950 mm de consumo ao longo do ciclo.

Figura 4.2 – Irrigação Acumulada ao longo do ciclo das oito variedades de cana-de-açúcar

No início do experimento, devido ao pequeno porte das plantas e clima mais ameno no decorrer dos subsequentes 120 a 180 dias a demanda hídrica foi menor, , após esta data, em virtude de maior área foliar e dias mais quentes e longos a demanda aumentou constantemente, Figuras 4.3 e 4.4.

Figura 4.3 – Lâmina de Irrigação aplicada por irrigação das variedades V1, V2, V3 e V4

Figura 4.4 – Lâmina de Irrigação aplicada por irrigação das variedades V5, V6, V7 e V8

4.2.4. Variedades

As variedades comerciais de cana-de-açúcar utilizadas no experimento foram definidas de comum acordo com os responsáveis técnicos e administrativos da empresa parceira no projeto, contemplando as principais variedades de interesse científico e comercial, sendo estas representativas dos três principais (mais tradicionais) programas de melhoramento do país: Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA); Instituto Agrônomo de Campinas (IAC); Centro de Tecnologia Canavieira (CTC). Entre as oito variedades, incluiu-se uma variedade sul-africana, considerada como um padrão internacional para modelagem dessa cultura.

Ressalta-se que, atendendo à cláusula terceira do termo de convênio de cooperação firmado entre FAPESP, Odebrecht Agroindustrial e USP (*"Respeitar e fazer respeitar as restrições à divulgação de informações e as limitações impostas por direitos autorais e de propriedade intelectual"*), as variedades foram codificadas aleatoriamente como V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8, respeitando o direito de exclusividade para a empresa parceira do projeto.

4.2.5. Variáveis avaliadas e monitoradas

4.2.5.1. Dados edáficos e meteorológicos

Os elementos meteorológicos foram monitorados no interior da casa de vegetação, visando à estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), assim como a aquisição de parâmetros para modelagem de crescimento (CANEGRO) e auxílio na interpretação dos resultados. Desta forma, foram monitorados a densidade de fluxo ($W.m^{-2}$) da radiação solar global (R_g), através de piranômetro de silício (LI200X - Campbell Sci.), da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), através de sensor quântico (LI190SB - Campbell Sci.) e o saldo de radiação (R_n), através de saldo radiômetro (NRLITE - Campbell Sci.), assim como a temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%), através de sensor Vaissala (HMP45C - Campbell Sci.), este último sensor foi instalado em duas diferentes alturas dentro da casa de vegetação, um à altura

imediatamente superior ao dossel da planta e outro sensor no topo da estufa (~5,5 metros).

Os dados foram coletados a cada 30 segundos e armazenados em sistema de aquisição de dados (datalogger) com médias de 15 minutos.

4.2.5.2. Tempo Térmico

O tempo térmico é uma medida de tempo fisiológico largamente utilizada para fins de modelagem (OMETTO, 1981). Sua utilização melhorou a descrição e previsão de eventos fenológicos em comparação com outras abordagens como época do ano e número de dias (MCMASTER e WILHELM, 1997). Funções baseadas na soma térmica descrevem as fases da cultura, a taxa de perfilhamento, o pico populacional, o desenvolvimento de folhas entre outros (MARIN, 2014; INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS et al., 2008).

O conceito de tempo térmico (graus-dia), usualmente, considera que existe uma relação linear entre a taxa de desenvolvimento da planta e a temperatura média, dentro de limites definidos de temperaturas máxima e mínima (WARRINGTON e KANEMASU, 1983). Os dados de temperatura máxima, mínima e média do ar para o cálculo da soma térmica foram monitorados e obtidos no interior da casa de vegetação em altura imediatamente superior ao topo do dossel, desta maneira o sensor Vaissala (HMP45C - Campbell Sci.), Figura 4.5, foi elevado com o decorrer do ciclo da cana-de-açúcar. Estes valores foram agrupados em base diária obtendo-se a temperatura máxima e mínima utilizadas para o cálculo do tempo térmico diário.

Figura 4.5 – Sensor Vaissala HMP45C - Campbell Sci, coleta temperatura máxima e mínima

O cálculo da soma térmica, em graus-dia, foi realizado com base na equação inicialmente proposta por Arnold (1960):

$$GDD = \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \right) - T_{\text{base}} \quad 4.1$$

Em que:

GDD: Total de graus-dia acumulado

T_{base} : Temperatura base da cultura

$T_{\max}$: Temperatura máxima do dia;

$T_{\min}$: Temperatura mínima do dia;

Como observado na equação 4.1, a temperatura base influencia diretamente na obtenção do tempo térmico. Neste caso foi utilizada a temperatura base de 10 °C (SINGELS et al., 2008). Para os cálculos foi considerado que na temperatura média inferior a 10°C não ocorria acréscimo de graus dia, sendo considerado $GDD = 0 \text{ °Cd}$ para este eventual acontecimento.

4.2.6. Parâmetros Mensurados e Estimados

Dos 20 parâmetros de cultivares, 11 (LFMAX, MXLFAREA, MXLFARNO, PI1, PI2, PSWITCH, MAX_POP, POPTT16, TTRATNEM, CHUPIBASE e TT_POPGROWTH) são derivados de observações experimentais realizadas na casa de vegetação, os 9 demais parâmetros (PARCEmax, APFMX, STKPFMAX, SUCA, TBFT, Tthalf, Tbase, TTPLNTEM, LG_AMBASE) foram parametrizados ou manteve-se os valores padrões do modelo CANEGRO/DSSAT. Todos os parâmetros foram ajustados em função dos limites encontrados nas mensurações ou baseados em limites publicados por Singels et al. (2008), Marin et al. (2011), Nassif et al. (2012). A calibração foi realizada manualmente seguindo-se a sequência recomenda pelos pesquisadores Matthew Jones e Abraham Singels, conforme Anexo I.

4.2.6.1. Área Foliar (LFMAX, MXLFAREA, MXLFARNO)

Os parâmetros envolvendo a área foliar de cana-de-açúcar foram mensurados em na casa de vegetação e em laboratório com o auxílio do integrador de área foliar da Licor “LI-3100C”, Figura 4.6. Neste aparelho a amostra percorre sob uma fonte de luz fluorescente, o objeto então projetado é refletido por um sistema de

três espelhos para uma câmara de matriz linear. À medida que a amostra passa por baixo da fonte de luz, a área acumulada, em cm^2 , é mostrado no visor LED ou no computador ao utilizar o software Windows®. Resumidamente este aparelho é um scanner de grande porte que consegue medir objetos de grandes dimensões, pois traciona de maneira contínua o objeto a ser medido sobre o sensor de imagem.

Figura 4.6 – Integrador de Área Foliar LICOR “LI-3100C”

O LFMAX é o número máximo de folhas verdes saudáveis que uma planta adequadamente irrigada atinge antes que folhas mais velhas entrem em senescência. Este parâmetro foi mensurado através da contagem do número de folhas verdes até que a folha mais velha tornasse senescente.

Determinou-se o parâmetro MXLFAREA através da mensuração da área foliar de cada folha nas quatro épocas de amostragem, destas medidas plotou-se um gráfico entre o número da folha e sua respetiva área foliar, determinando desta maneira o MXLFAREA e o MXLFARNO..

4.2.6.2. Filocrono (PI, PI2, PSWITCH)

O tempo, em graus-dia, decorrido entre a aparência de duas folhas sucessivas é denominado de filocrono (Singels et al., 2008; Inman-Bamber 1994). Em cana-de-açúcar o filocrono pode ser determinado pela observação do aparecimento de duas folhas completamente expandidas (número de folhas expandidas) ou pelo surgimento de duas folhas ainda não expandidas, número total de folhas (BONNET, 1998; CAMPBELL, 1998). Neste estudo realizou-se a contagem do número de folhas expandidas (NFE).

A contagem do número folhas foi realizada durante o período de 09/04/2014 (700 °Cd) até o dia 22/12/2014 (3600 °Cd).

Aproximadamente quatro semanas após o corte da cana planta foram selecionados 192 perfilhos na área referente à quarta época de amostragem. Nestas plantas foram marcadas, através de um barbante com o respectivo número, todas as folhas mais jovens totalmente expandidas (+1), Figura 4.7. Com intervalos de dois a três dias, entre mensurações, foi contabilizado o número de folhas totalmente expandidas. Uma folha foi considerada expandida quando estava com lígula visível.

Os dados de NFE e ST foram plotados num gráfico cartesiano. Após, verificou-se qual o padrão de relacionamento entre as duas variáveis e consequentemente gerou-se a equação que melhor representa esta relação.

Dois valores de filocrono (PI_1 e PI_2) aplicam-se as folhas abaixo e acima de um limite específico de cada variedade (SINGELS et al., 2008), limite que leva em consideração a abordagem de “Broken Stick” como sugerido por Inman-Bamber (1994), melhor observado na Figura 4.8. Calculou-se o filocrono como único para todo o ciclo de cultivo (FILOgeral), bem como o filocrono para as folhas até o ponto de “Broken Stick” (PI_1) e para as folhas restantes (PI_2). O filocrono foi calculado pelo inverso do coeficiente angular da regressão linear entre NF e ST. O ponto de “Broken Stich” foi determinado visualmente pela análise das regressões lineares. Verificou-se que este ponto é mais evidente quando se eleva a temperatura base, sendo utilizado este procedimento como auxílio à determinação do PSWITCH. Por este motivo calculou-se, também o filocrono variando a temperatura de base de 6 a 24 °C.

Figura 4.7 – Contagem/Marcação do aparecimento de folhas

Figura 4.8 – Ilustração do “Broken stick” abordagem para aparecimento de folhas, usado no Canegro, Singels, et al. 2008

4.2.6.3. MAX_POP , TT_POPGROWTH e POPTT16

A população máxima de perfilhos (MAX_POP) foi determinada a partir da contagem do número de perfilhos por touceira no experimento dentro da casa de vegetação, após a contagem plotou-se um gráfico entre o tempo térmico e a população de perfilhos, determinando desta maneira além do parâmetro MAX_POP, os parâmetros TT_POPGROWTH e POTT16, porém o parâmetro TT_POPGROWTH é determinado na temperatura base de 10°C e o POPTT16 com a temperatura base de 16°C (SINGELS et al. 2008).

4.2.6.4. TTPLNTEM e TTRATNEM

Estes dois parâmetros simulam a emergência do perfilho primário na cana planta (TTPLNTEM) e nas socas (TTRATNEM), neste estudo foi analisado somente o tempo térmico acumulado para emergência na cana soca. Após a colheita da cana planta analisou-se diariamente um total de 192 parcelas nas oito variedades a emergência dos colmos primários, obtendo desta maneira, com temperatura base de 10°C, o tempo térmico entre a colheita e o aparecimento dos primeiros perfilhos.

4.2.6.5. CHUIBASE

O parâmetro CHUIBASE é responsável pela simulação do início do crescimento de colmos, sendo este o tempo térmico acumulado da emergência dos colmos primários até o início do alongamento de colmos. O critério adotado para

determinação deste parâmetro baseou-se na avaliação do aparecimento de “nós”, no momento do surgimento do primeiro “nó” computava-se o tempo térmico, por este motivo não foi determinado um momento exato e sim uma faixa de graus dias.

4.3. Resultados e Discussão

O experimento foi conduzido durante 376 dias (16/02/2015 a 27/02/2015), período que compreendeu entre a colheita do primeiro ciclo de cultivo (cana-planta) e a colheita final deste experimento.

4.3.1. Dados Meteorológicos

Os elementos meteorológicos temperatura e radiação solar, essenciais para o desenvolvimento e crescimento das culturas foram monitorados em frequência diária, uma vez que modelos do DSSAT simulam neste intervalo de tempo. A variação destes elementos é apresentada na Figura 4.9. Neste ciclo a temperatura máxima ocorreu aos 330 DAC ($40,81^{\circ}\text{C}$), a temperatura mínima aos 100 DAC ($6,65^{\circ}\text{C}$), e radiação global com máximo aos 265 DAC ($21,80 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e mínimo aos 150 DAC ($2,14 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Figura 4.9 – Variação Diária da Temperatura máxima, Temperatura mínima e radiação Total no interior da casa de vegetação

A temperatura média também foi monitorada durante este ciclo, vale que ressaltar que no módulo clima/tempo do DSSAT os dados inseridos são de temperatura máxima e mínima, mas é a temperatura média, através da soma térmica que delimita, por exemplo o estágio fenológico, a emissão e senescência de folhas. A temperatura média (Figura 4.10) para o período foi de 23,07 °C, sendo, em termos médios diários, a temperatura máxima 31,07 °C e temperatura mínima de 13,85 °C. Estes dados indicam que em todos os dias de cultivo houve acúmulo térmico, Figura 4.11, com temperatura base de 10°C. A título de comparação os dados da temperatura média do lado externo da casa de vegetação também estão na Figura 4.10. Observa-se que o comportamento dentro da casa de vegetação aproximou-se do comportamento da temperatura média fora da casa de vegetação. A temperatura do ar no interior de ambiente protegido pode variar de acordo com seu volume e tamanho, bem como o tipo de cobertura, presença ou não de cortinas, bem como sua abertura (SEEMANN, 1979). Porém de acordo com Santos et al., (2010) esta influência é maior na temperatura máxima, não afetando tanto a temperatura mínima e média. Esta informação corrobora com os dados verificados neste experimento, em que houve apenas 0,33% de aumento da temperatura média, 1,25 % da temperatura mínima e 5,72 % da temperatura máxima.

Figura 4.10 – Temperatura média no interior da casa de vegetação e do posto meteorológico da ESALQ/USP

A soma térmica do período foi calculada através da temperatura média e a temperatura base de 10° C, utilizada para emissão de folhas, e 16°C, utilizada na fenologia dos colmos (SINGELS et al., 2008). Segundo Inman-Bamber (1991), a soma térmica é capaz de descrever e delimitar as fases da cultura, a taxa de perfilhamento, o pico populacional, a fase de senescência e a fase de maturação. A evolução da soma térmica encontra-se na Figura 4.11, na média houve um incremento diário de 13,68 °C, analisando estes dados verifica-se que os menores aumentos foram nos meses de maio, abril, junho, julho e início de agosto, meses em que a temperatura média variou de 13,85 a 22,28 °C. A soma térmica total neste ciclo foi de 5048,67 °Cd. Respeitando-se os limites de temperatura da cana-de-açúcar quanto maior a temperatura média do ar mais rápido será o desenvolvimento, com temperaturas mais elevadas conseguir-se-á atingir esta mesma soma térmica em menor tempo.

Figura 4.11 – Acúmulo de graus dias ao longo do ciclo, considerando $T_b = 10^\circ \text{C}$

Os valores médios de radiação solar global no interior da casa de vegetação foram inferiores aos medidos externamente no posto meteorológico da ESALQ. A radiação global, média, dentro da casa de vegetação foi de $12,30 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e no posto meteorológico de $20,88 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Na Figura 4.12 encontra-se a relação diária da radiação solar interna e externa à casa de vegetação. Na média, a radiação no interior da casa de vegetação representou 58,17 % da radiação mensurada na de vegetação, ou seja, houve uma atenuação média de 41,83 %. De acordo com Tuller e Peterson (1988), a transmissividade do material de cobertura à radiação solar depende de suas características químicas e físicas, condições atmosféricas, ângulo

de incidência dos raios solares, condensação no interior da superfície de cobertura, tempo de exposição às condições ambientais e deposição de partículas sólidas, como poeira e fuligem. A influência destas características explica a grande amplitude de atenuação que ocorre durante um ano de cultivo; neste ciclo os valores variaram de 43,8 % a 72,7 %.

Folegatti et al. (1997) descreveram a relação entre a radiação em ambientes protegidos e abertos; estes autores relataram que em média 37% da radiação solar global era perdida por reflexão ou absorção, ou seja, 63% da radiação chega ao dossel da cultura. Beckmann et al. (2006) verificaram em seu experimento no estado do Rio Grande do Sul que a radiação solar global interna representou 76% da radiação solar global externa. Barbosa (2015) trabalhando nesta mesma casa de vegetação observou que a relação entre a radiação interna e externa variou de aproximadamente 30 % a 60% ao longo do ano, de fevereiro de 2013 a fevereiro de 2014.

Figura 4.12 – Valores diários da Radiação no interior da casa de vegetação (RAD Interna), Radiação externa à casa de vegetação (RAD Externa) e relação entre a radiação interna e Externa (RAD Interna / RAD Externa)

4.3.2. Dados da Cultura

4.3.2.1. Área Foliar (LFMAX, MXLFAREA, MXLFARNO)

O número máximo de folhas verdes (LFMAX) mostrou-se inferior, em todas as variedades brasileiras se comparado à variedade padrão NCo376 (V8). O

número, médio, de folhas verdes variou de 8,2 a 10 nas variedades brasileiras. Para a variedade NCo376 o número de folhas verdes encontrado foi de 12 folhas, valor igual ao utilizado no modelo CANEGRO. Verifica-se, Figura 4.13, que há uma dispersão de ± 1 folha em todas as variedades, com exceção da V7 que foram observados LFMAX variando de 5 a 11. Os dados encontrados neste experimento são semelhantes aos verificados em outras variedades brasileiras por Marin et al. (2011; 2014 e 2015) e Nassif et al. (2012) que observaram valores de LFMAX variando entre 9 e 10.

Figura 4.13 – Gráfico box plot do número máximo de folhas verdes das oito variedades

A área foliar máxima de uma folha (MXLFAREA) e o número da folha em que ocorre a máxima área foliar (MXLFARNO) foram determinados conforme Figura 4.14 e 4.15. Os valores encontrados indicam que o MXLFAREA das variedades brasileiras é superior aos valores da NCo376, com exceção da V6 que apresentou 324,5 cm² de área máxima, valor próximo aos 360 cm² da NCo376. Nas demais variedades observou-se que MXLFAREA é, em média, 60% maior que o valor padrão (NCo376), chegando a 100% no caso da variedade V7. Estes dados corroboram com os valores encontrados por Nassif et al. (2012) e Marin et al. (2011, 2014 e 2015) que apresentaram valores até 50% maiores que o valor padrão nas variedades RB72454, SP83-2847, CTC 4, CTC 7, CTC 20, RB867515 e RB835486. Verifica-se que há grande variabilidade na área foliar o que dificulta a definição do

MXLFARNO. Considerando a área foliar média, o MXFLARNO variou de 17 a 19, com exceção da variedade V4 que a área foliar máxima ocorreu na folha 24.

Os valores encontrados na variedade V8 (NCo376) são próximos aos valores padrões, o que demonstra a pouca influência das condições meteorológicas (ideais) no comportamento desta variedade no que diz respeito aos parâmetros relacionados a folha.

Figura 4.14 – Área foliar individual em função do número da folha das variedades (V1), (V2), (V3) e (V4)

Figura 4.15 – Área foliar individual em função do número da folha das variedades (V5), (V5), (V7) e (V8)

4.3.2.2. Filocrono

Os dados de número de folhas expandidas (NFE) e soma térmica (ST) foram plotados num gráfico cartesiano onde se verificou padrão linear de relação entre as duas variáveis.

A plotagem dos dados juntamente com a equação encontra-se entre as figuras 4.16 e 4.23. Calculou-se o filocrono como único para todo o ciclo de cultivo (FILOgeral), bem como o filocrono para as folhas até o ponto de “Broken Stick” (PI_1) e para as folhas restantes (PI_2). O filocrono foi calculado pelo inverso do coeficiente angular da regressão linear entre NFE e ST. Observa-se na tabela 4.5 que a V6 é a variedade com menor filocrono, ou seja, há emissão de folhas com frequência maior que as demais variedades, possivelmente por se tratar de uma variedade precoce.

Tabela 4.5 – Filocrono geral (FILOgeral), filocrono até o ponto de “Broken Stick” (PI_1), filocrono das demais folhas restantes (PI_2) e o PSWITCH

Variedade	FILOgeral (°Cd)	PI_1 (°Cd)	PI_2 (°Cd)	PSWITCH
V1	149	114	149	12
V2	151	136	166	16
V3	149	142	151	15
V4	133	113	135	11
V5	153	140	144	15
V6	129	117	135	17
V7	142	128	140	11
V8	147	113	142	12

Cada variedade continha 24 repetições, calculou-se então o PI_1 e PI_2 para todas as repetições plotando estes dados em um gráfico do tipo Box-plot, Figura 4.24. Verifica-se que há uma grande variabilidade entre os valores obtidos. De maneira geral, levando em consideração a mediana dos dados, observa-se que para todas as variedades o PI_2 é maior que PI_1, isto indica que a partir do ponto de quebra (“Broken Stick”) necessita de um maior acúmulo térmico para que uma nova folha seja emitida.

Figura 4.16 – V1, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca

Figura 4.17 – V2, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca

Figura 4.18 – V3, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca

Figura 4.19 – V4, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca

Figura 4.20 – V5, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca

Figura 4.21 – V6, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca

Figura 4.22 – V7, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca

Figura 4.23 – V8, Relação entre a soma térmica acumulada e o número de folhas expandidas, (A) FILOgeral, e (B) PI_1 e PI_2 em cultivo de cana soca

Figura 4.24 – Gráfico Box-plot para os filocronos um e dois (PI_1 e PI_2) das oito variedades estudadas

Outra abordagem utilizada foi o cálculo do filocrono variando a temperatura basal de 6 a 24°C, utilizou-se como base o mesmo PSWITCH, verificando anteriormente. Os resultados destes cálculos encontram-se na Tabela 4.6. Verifica-se há uma diminuição do filocrono com o aumento da temperatura base. Para a maioria das variedades os valores de PI_1 ficaram ligeiramente superiores aos encontrados por Inman-Bamber (1994), que encontrou valores de filocrono variando de 109 e 118°C dia folha⁻¹ até a folha 14 e ligeiramente inferior no PI_2, onde este mesmo autor encontrou 169 e 200°C dia folha⁻¹, utilizando as variedades NCo 376 e N12. A partir da temperatura de 16°C, os valores são muito abaixo dos encontrados na literatura, entretanto os valores encontrados entre as temperaturas de 12 e 14°C assemelham-se as referências de Inman-Bamber (1994) e Singels et al. (2008), o que pode ser um indicio que a temperatura basal de 10°C não é adequada para variedades brasileiras.

Tabela 4.6 – Valores de filocrono (PI_1 e PI_2) das oito variedades em função de diferentes temperaturas basais

Tb	V 1		V 2		V 3		V 4		V 5		V 6		V 7		V 8	
	PI_1	PI_2	PI_1	PI_2	PI_1	PI_2	PI_1	PI_2	PI_1	PI_2	PI_1	PI_2	PI_1	PI_2	PI_1	PI_2
6	158	183	189	213	197	192	156	174	196	184	164	172	175	183	156	178
8	136	162	162	190	169	171	135	154	168	164	140	153	151	161	135	153
10	115	141	136	168	141	151	113	134	141	144	117	134	127	140	113	128
12	93	120	109	145	113	130	92	114	114	124	94	115	103	118	91	102
14	72	99	83	122	85	109	71	94	86	104	71	97	79	97	70	77
16	50	78	56	99	58	89	49	74	59	84	48	78	56	76	48	53
18	30,8	58,0	32,7	76,7	32,9	68,9	30,2	55,3	34,4	65,1	27,4	59,7	34,1	56,1	28,7	30,4
20	14,0	39,1	13,7	54,5	13,3	48,8	13,8	37,4	14,7	45,9	11,1	41,5	15,6	37,4	12,4	12,8
22	4,8	23,3	4,2	34,1	3,7	30,5	4,9	22,3	4,6	28,4	3,1	25,4	5,9	22,1	4,0	4,0
24	1,5	10,8	1,1	17,0	1,0	15,1	1,5	10,4	1,3	13,8	0,8	12,3	2,0	10,2	1,2	1,1

Obs. Tb: Temperatura base, °C; PI_1: Filocrono um e PI_2: Filocrono dois

4.3.2.3. MAX_POP , TT_POPGROWTH e POPTT16

Os parâmetros que envolvem a população de colmos, Figura 4.25, apresentaram grande dispersão. Em todas as variedades o número máximo de perfilhos m^{-2} atingiu valores elevados, superiores a 42 perfilhos m^{-2} . Este valor é superior ao valor padrão (30 perfilhos m^{-2}) utilizado no CANEGRO e também superior ao publicado por Marin et al. (2011) e Nassif et al. (2012) que encontraram valores inferiores a 21 perfilhos m^{-2} , entretanto esta alta dispersão é constatada em Inman-Bamber (1991) e Inman-Bamber (1994), que são trabalhos referências para o CANEGRO e na própria documentação científica do modelo (Singels et al., 2008) que indica uma variação de 20 a 80 perfilhos m^{-2} como população máxima de colmos.

O TT_POPGROWTH que é um parâmetro responsável pelo pico de perfilhamento e calculado em função da temperatura base de 10 °C não foi mensurado com precisão, uma vez que a primeira avaliação foi realizada com 37 dias após a colheita da cana planta. Nesta avaliação o número de perfilhos já se apresentou elevado e nas avaliações posteriores este número decresceu o que inviabilizou a definição correta (em campo) deste parâmetro, posteriormente este foi calibrado como pode ser verificado no tópico 4.3.5 “Parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO”. Esta avaliação do número de perfilhos deve ser realizada com maior frequência nos primeiros 60 dias após a colheita.

O parâmetro POPTT16 que significa a população de colmos aos 1600 °Cd (com temperatura base de 16°) indica a estabilização do número de perfilhos. Nas variedades V1 e V7 encontrou-se em média 11 perfilhos m^{-2} , nas variedades V2, V3, V4, V5 e V6 o número de perfilhos, variou de 16 a 19. Em termos médios o valor encontrado na V8 (NCo376) foi superior aos 13,3 utilizado no modelo CANEGRO. Os resultados encontrados neste experimento são superiores aos valores publicado por Nassif et al. (2012), Marin et al. (2011) e Marin et al. (2015) que encontraram perfilhamento aos 1600 °Cd inferior a 10 perfilhos m^{-2} .

Figura 4.25 – Número de perfilhos m^{-2} em função do número de graus dias (Soma) térmica na temperatura base de 16°C das oito variedades

4.3.2.4. TTRATNEM

O tempo térmico para emergência da cana soca (TTRATNEM), Figura 4.26, foi mensurado através da observação visual da brotação após a colheita da cana planta.

Em termos médios o TTRATNEM variou de 138 (V7) a 109 °Cd (V6). Observa-se que os valores encontrados são inferiores aos 203 °Cd indicado por Singels et al. (2008) como padrão do modelo CANEGRO e também inferiores aos valores encontrados por Nassif et al. (2012), Marin et al. (2011) e Marin et al. (2015) que indicam TTRATNEM de até 290 °Cd. A diferença em relação a estes dois últimos autores pode ser em função da profundidade de plantio realizada em condições de casa de vegetação e em condições de campo. Com exceção das variedades V2 e V7, houve grande dispersão entre as repetições, em V4, por exemplo, o TTRATNEM variou de 70 a 150 ° Cd.

Figura 4.26 – Tempo térmico para emergência da cana soca (TTRATNEM) das oito variedades

4.3.3. Resumo dos parâmetros de cultivares mensurados e calibrados

Nas tabelas 4.7 e 4.8 encontram-se os valores dos parâmetros medidos na casa-de-vegetação, parâmetros após calibração das oito variedades (V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8) e os valores dos parâmetros da variedade NCo376 presentes no DSSAT/CANEGRO (SINGELS et al. 2008).

Como discutido anteriormente, os parâmetros que não foram mensurados, mas somente calibrados de acordo com limites encontrados na literatura, sendo a diminuição ou o acréscimo igual em todas as variedades, após este processo apenas verificou-se os índices estatísticos melhoravam ou não, desta maneira os parâmetros oriundos apenas da calibração não são específicos destas variedades, eles reforçam as hipóteses levantadas e conclusões de Marin et al. (2011), Nassif et al. (2012) de que há diferença entre os parâmetros considerados padrões e os parâmetros das variedades brasileiras.

Tabela 4.7 – Valores de parâmetros de cultivares medidos e calibrados para as variedades V1, V2, V3 e V4 e da variedade padrão NCo376

Parâmetros	NCo376 Padrão*	V1		V2		V3		V4	
		Medidos	C. Final	Medidos	C. Final	Medidos	C. Final	Medidos	C. Final
MaxPARCE	9,9	--	11,4	--	11,4	--	11,4	--	11,4
APFMX	0,88	--	0,92	--	0,92	--	0,92	--	0,92
STKPFMAX	0,65	--	0,70	--	0,70	--	0,70	--	0,70
SUCA	0,58	--	0,62	--	0,62	--	0,62	--	0,62
TBFT	25	--	25	--	25	--	25	--	25
Tthalf	250	--	250	--	250	--	250	--	250
TBase	16	--	16	--	16	--	16	--	16
LFMAX	12	8,2	7	8,8	8	8,7	8	9	9
MXLFAREA	360	512	512	509	590	697	697	560	560
MXLFARNO	15	18	18	18	16	17	17	24	24
PI1	69	114	141	136	130	142	142	113	130
PI2	169	149	250	166	195	151	181	135	178
PSWITCH	18	12	13	16	14	15	15	11	11
TTPLNTEM	428	--	428	--	428	--	428	--	428
TTRATNEM	203	112	112	132	131	135	140	117	117
CHUPIBASE	1050	500 1000	515	600 1000	625	600 1000	470	700 1200	635
TT_POPGROWTH	600	492	730	476	735	476	730	492	735
MAX_POP	30	56,1	56	66	66	50	49	88	88
POPTT16	13,3	11,6	11,6	19	19	18	14	17	17
LG_AMBASE	220	--	220	--	220	--	220	--	220

* Dados extraídos de Singels et al. (2008); C. Final – calibração final;

Tabela 4.8 – Valores de parâmetros de cultivares medidos e calibrados para as variedades V5, V6, V7 e V8 e da variedade padrão NCo376

Parâmetros	NCo376 Padrão	V5		V6		V7		V8	
		Medidos	C. Final	Medidos	C. Final	Medidos	C. Final	Medidos	C. Final
MaxPARCE	9,9	--	11,4	--	9,9	--	9,9	--	9,9
APFMX	0,88	--	0,92	--	0,92	--	0,88	--	0,88
STKPFMAX	0,65	--	0,70	--	0,70	--	0,70	--	0,65
SUCA	0,58	--	0,62	--	0,62	--	0,62	--	0,58
TBFT	25	--	25	--	25	--	25	--	25
Tthlfo	250	--	250	--	250	--	250	--	250
TBase	16	--	16	--	16	--	16	--	16
LFMAX	12	8,5	8	10	10	8,5	8	12	11
MXLFAREA	360	476	506	325	384	722	738	332	332
MXLFARNO	15	17	15	17	16	19	13	18	17
PI1	69	140	151	117	122	128	130	113	105
PI2	169	144	200	135	157	140	185	142	205
PSWITCH	18	15	15	13	12	11	12	10	18
TTPLNTEM	428	--	428	--	428	--	428	--	428
TTRATNEM	203	130	130	109	108	138	138	125	125
CHUIBASE	1050	600	490	450	360	600	610	700	730
		1000		850		1000		1100	
TT_POPGROWTH	600	923	730	956	720	923	725	476	600
MAX_POP	30	53	54	69	69	47	47	69	68
POPTT16	13,3	16,4	16,4	21,5	12,5	11,1	11,0	16,9	17,0
LG_AMBASE	220	--	220	--	220	--	220	--	220

* Dados extraídos de Singels et al. (2008); C. Final – calibração final;

4.3.4. Parâmetros Ecótipos

Os parâmetros de ecótipos são considerados mais estáveis e com pouca variação entre as diferentes variedades, por este motivo é considerado para um conjunto de variedades e não específico como os parâmetros de cultivares. Baseado nos trabalhos de Inman-Bamber (1991), Inman-Bamber (1994) e Singels et al. (2008) determinou-se alguns parâmetros ecótipos relacionados ao desenvolvimento de folhas.

Dentre todos os parâmetros ecótipos determinaram-se equações quadráticas da área foliar, largura máxima de folhas e do comprimento de folhas e a temperatura base para aparecimento de folhas +1.

4.3.4.1. Equações quadráticas da Área foliar, Largura máxima e Comprimento de folhas

As equações relacionadas à área foliar encontram-se nas Figuras 4.27 e 4.28. De acordo com Inman-Bamber (1991) e Singels et al. (2008) as equações relacionadas à área foliar são ajustadas por modelos quadráticos, entretanto percebeu-se em Inman-Bamber (1994) e em Singels et al. (2008) que os dados foram posteriormente ajustados a modelo linear. Por este motivo duas equações foram geradas, uma com ajuste em modelo quadrático e outra com ajuste em modelo linear até a folha como realizado por Inman-Bamber (1994). Em todas as variedades os parâmetros diferenciam dos valores considerados padrões, entretanto destaca-se que o ajuste ao modelo linear é visual o pode gerar erros na sua determinação. Inman-Bamber et al. (2008) relata equações da área foliar para as variedades Q138 e Q183 também diferentes das equações utilizados no modelo padrão do CANEGRO/DSSAT. Este autor trabalhou com tratamento irrigado e sequeiro e encontrou as seguintes equações $y = -3,5 + 35,7x$ para Q138 'irrigado', $y = 48,2 + 29,0x$ para Q138 em 'sequeiro', $y = 58,0 + 27,5x$ para Q183, 'irrigado' e $y = 100,6 + 22,5x$ para Q183, 'sequeiro'.

Com relação ao comprimento máximo de folha, Figuras 4.29 e 4.30, este foi ajustado somente ao modelo quadrático ($ax^2 + bx + c$). Como pode ser observado o coeficiente "a" das equações variou de -0,171 a -0,370, destaca-se que o resultado encontrado na variedade V8, foi próximo ao valor padrão, sendo respectivamente -0,338 e -0,376.

No que diz respeito à máxima largura de folhas, Figura 4.31 e 4.32. Realizou-se também somente ao modelo quadrático. Em todas as variedades os coeficientes "a" e "b" foram superiores ao valor padrão apresentado em Singels et al. (2008).

Figura 4.27 – Regressão quadrática e linear entre o número da folha e área foliar de cada folha das variedades V1, V2, V3 e V4

Figura 4.28 – Regressão quadrática e linear entre o número da folha e área foliar de cada folha das variedades V5, V6, V7 e V8

Figura 4.29 – Regressão quadrática entre o número da folha e comprimento de cada folha das variedades V1, V2, V3 e V4

Figura 4.30 – Regressão quadrática entre o número da folha e comprimento de cada folha das variedades V5, V6, V7 e V8

Figura 4.31 – Regressão quadrática entre o número da folha e a largura máxima de cada folha das variedades V1, V2, V3 e V4

Figura 4.32 – Regressão quadrática entre o número da folha e a largura máxima de cada folha das variedades V5, V6, V7 e V8

4.3.4.2. Temperatura base para aparecimento de folhas

Com os dados da soma térmica utilizado para determinação do filocrono estimou-se a temperatura base para o aparecimento de folhas +1. Considerou-se a temperatura que apresentasse a menor soma dos quadrados do erro. Como pode ser observado na Figura 4.33, até a temperatura base de 10 a 14 °C houve pouca diferença no erro, entretanto a partir da temperatura de 14°C há grande incremento no erro. Com exceção da variedade V1, a temperatura base foi inferior 13°C, entretanto superior ao valor (10°C) utilizado como padrão no modelo DSSAT/CANEGRO. A diferença de temperatura base tem influência direta no ajuste do filocrono, o aumento da temperatura base diminui o filocrono que consequentemente pode influenciar no número de folhas. Inman-Bamber (1994) utilizando esta mesma metodologia e utilizando uma faixa de -2 a 20°C concluiu que a temperatura base até a temperatura de 12°C pouco influenciou no erro.

Figura 4.33 – Soma dos quadrados do erro em função de diferentes temperaturas basais para o surgimento de folhas +1 das oito variedades

4.3.5. Resumo dos Parâmetros de Ecótipos

Os parâmetros de ecótipos estão resumidos na Tabela 4.9, como discutido anteriormente houve divergência em relação aos parâmetros utilizados no modelo CANEGRO/DSSAT, entretanto esta variação também é constatada por outros por

outros pesquisadores. Por este motivo deve ser realizada uma calibração alterando-se estes parâmetros para avaliar a influencia destes nas variáveis de saída.

Tabela 4.9 – Valores de parâmetros de ecótipos medidos e das oito variedades e da variedade padrão NCo376

Parâmetros	NCo376 Padrão	V1*	V2*	V3*	V4*	V5*	V6*	V7*	V8*
AREAMX_CF(1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AREAMX_CF(2)	27,2	39,7	23,1	33,5	37,9	33,9	24,1	45,7	21,5
AREAMX_CF(3)	-20,8	-18,4	98,2	93,8	1,8	-8,0	21,9	-15,5	17,3
WMAX_CF(1)	-0,0345	-0,141	-0,110	-0,0844	-0,0964	-0,143	-0,0747	-0,153	-0,0897
WMAX_CF(2)	2,243	5,557	4,768	4,011	4,546	5,677	3,352	6,193	3,649
WMAX_CF(3)	7,75	3,89	7,66	15,53	9,65	3,68	10,05	7,19	9,60
LMAX_CF(1)	-0,376	-0,285	-0,195	-0,259	-0,293	-0,370	-0,171	-0,235	-0,338
LMAX_CF(2)	12,2	10,0	7,7	9,7	10,7	12,9	6,9	9,7	11,8
LMAX_CF(3)	21,8	63,0	73,5	72,2	47,9	37,2	68,3	61,4	37,8
MAXLFLENGTH	100	151	149	163	145	150	138	161	141
MAXLFWIDTH	3,5	5,9	5,9	6,3	6,3	6,0	4,8	7,0	4,7
TTBASELFEX	10	14,5	12,2	12,4	13,0	12,4	12,6	12,8	11,9

*Parâmetros mensurados, não calibrados

4.3.6. Parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO

Os parâmetros mensurados na casa de vegetação foram ajustados com base na faixa de valores possíveis. Os ajustes foram realizados comparando os dados observados e simulados das variáveis de saída: população de colmos, número total de folhas (verdes + secas), número de folhas verdes, altura de planta até a folha +1, índice de área foliar (IAF), matéria seca da parte aérea, matéria seca de colmos, sacarose, de acordo com a sequência no ANEXO I.

O perfilhamento, Figura 4.34, não apresentou bom ajuste, sendo que o modelo subestimou o número de perfilhos em praticamente todo o ciclo. Como pode ser observado na Tabela 4.10, em todas as variedades o R^2 foi inferior a 70% e o índice D inferiores a 0,6. Nassif et al. (2012) trabalhando com cultivo em campo encontrou R^2 de até 88% e índice D de 0,94. Neste experimento nem mesmo a variedade NCo376 apresentou bons índices de ajustes.

Tabela 4.10 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável número de perfilhos m^{-2}

VAR	Média (Perfilhos m^{-2})				R^2			RMSE			"D"		
	Obs.	Simulado			F	M	P	F	M	P	F	M	P
		F	M	P									
V1	39,00	16,86	16,86	17,48	0,60	0,60	0,53	26,83	26,83	26,64	0,56	0,56	0,55
V2	44,89	21,31	21,31	17,48	0,66	0,66	0,58	28,14	28,14	30,71	0,49	0,49	0,50
V3	34,33	18,13	18,13	17,48	0,53	0,53	0,40	20,38	20,38	21,15	0,58	0,58	0,56
V4	61,11	20,06	20,06	17,48	0,56	0,56	0,46	47,42	47,42	49,31	0,46	0,46	0,46
V5	41,11	19,70	19,70	17,48	0,44	0,44	0,35	24,72	24,72	26,55	0,49	0,49	0,48
V6	49,89	16,94	16,94	17,48	0,38	0,38	0,37	39,06	39,06	38,66	0,48	0,48	0,48
V7	35,33	16,68	16,68	17,48	0,39	0,39	0,28	21,82	21,82	21,52	0,53	0,53	0,52
V8	53,78	18,21	18,21	17,48	0,12	0,12	0,32	40,87	40,87	40,77	0,44	0,44	0,47

F – Calibração Final; M – Calibração momentânea, de acordo com a sequência (Anexo I); P – Calibração com os parâmetros padrões do DSSAT/CANEGRO

Dois pontos devem ser colocados em discussão, o primeiro que a temperatura interna da casa de vegetação, incluindo a temperatura do solo, é superior à temperatura em ambiente aberto e de acordo com Aude (1993) a temperatura no estágio de brotação das gemas influencia no número de colmos, no crescimento e na produção final de colmos industrializáveis. Outro ponto é a diferença entre perfilhos verdes e perfilhos industrializáveis. O modelo estima melhor o número de perfilhos industrializáveis, entretanto a literatura referência (SINGELS et al., 2008; INMAN-BAMBER, 1991) relatam apenas número de perfilhos, sem especificar o tipo.

Figura 4.34 – Número de perfilhos m⁻² estimados (linhas) e observados (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades

A variável número total de folhas (Figura 4.35) foi utilizada para o ajuste do filocrono (PI 1 e PI 2). Como pode ser observado, Tabela 4.11, esta variável apresentou bons índices estatísticos em todas as variedades com R^2 mínimo de 0,95, índice “D” superior a 0,94 e RMSE inferior a 2,5 folhas. Em todas as variedades o filocrono foi superior aos valores encontrados por Marin et al. (2011 e 2014) e Nassif et al. (2012), principalmente na variedade V1 que apresentou bom ajuste apenas com PI 2 igual a 250° Cd, valor muito superior aos verificados por estes referidos autores, para as demais variedades PI 1 variou de 105 a 151 °Cd e o PI 2 variou de 157 a 205 ° Cd. A calibração com filocrono elevado pode ser indício que a temperatura base para emissão de folhas (TTBASELFEX, 10°C) não é correta para as variedades brasileiras, como foi apresentado no tópico 4.3.4.2 (Figura 4.31), a variedade V1 foi a que apresentou a maior temperatura base (estimada pela correlação folhas +1 e temperaturas bases).

Comparando-se a estimativa do número total de folhas (NFT), verifica-se que houve, em média, redução de 81% do RMSE.

Tabela 4.11 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável número total de folhas (NFT)

VAR	Média (NFT)				R²			RMSE			"D"		
	Obs.	Simulado											
		F	M	P	F	M	P	F	M	P	F	M	P
V1	16,00	17,00	18,00	26,00	0,99	0,97	0,99	0,58	2,08	10,13	1,00	0,96	0,56
V2	17,00	18,00	19,00	26,00	0,99	0,99	0,99	1,29	3,65	8,84	0,95	0,89	0,60
V3	17,00	18,00	19,00	26,00	0,99	0,99	0,99	1,29	2,08	9,42	0,99	0,96	0,61
V4	17,00	18,00	20,00	26,00	0,99	0,99	0,99	1,00	2,52	9,04	0,99	0,95	0,64
V5	16,00	17,00	17,00	26,00	0,97	0,99	0,99	2,08	2,08	10,74	0,96	0,97	0,57
V6	19,00	20,00	21,00	26,00	0,99	0,99	0,99	1,29	2,65	7,05	0,99	0,96	0,73
V7	17,00	18,00	19,00	26,00	0,95	0,98	0,93	2,31	3,65	9,95	0,95	0,89	0,54
V8	19,00	21,00	21,00	26,00	0,99	0,99	0,98	2,16	2,16	7,14	0,96	0,96	0,70

F – Calibração Final; M – Calibração momentânea, de acordo com o Anexo I;

P – Calibração com os parâmetros padrões do DSSAT/CANEGRO

Figura 4.35 – Número total de folhas estimadas (linhas) e observadas (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades

O número de folhas verdes (Figura 4.36) foi utilizado para ajustes do parâmetro LFMAX, destaca-se que o filocrono também influencia a predição do modelo nesta variável, de acordo com as análises realizadas verificou-se que o modelo estima melhor esta variável com filocrono inferiores aos que ajustaram ao número total de folhas, o que reforça a hipótese que a temperatura base para emissão de folhas (TTBASELFEX, 10°C) não é correta para as variedades brasileiras. Observa-se que os índices estatísticos, Tabela 4.12, não foram excelentes, sendo que pior desempenho ocorreu na variedade V3, R^2 de 0,10 e índice "D" 0,585, estes índices aproximaram dos encontrados na parametrização realizada por Nassif et al. (2012) que observou R^2 de 0,01 (para CTC 4 e CTC 7) a 0,1 (para CTC 20), enquanto o índice D variou de 0,21 a 0,49. Os melhores índices foram observados na variedade V8 (NCo376) com R^2 de 0,71 e índice "D" de 0,881. A calibração de maneira geral resultou em redução de 57% do RMSE.

Tabela 4.12 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice "D" de Willmott para a variável número de folhas verdes (NFV)

VAR	Média (NFV)				R²			RMSE			"D"		
	Obs.	Simulado											
		F	M	P	F	M	P	F	M	P	F	M	P
V1	5,78	5,88	5,88	10,06	0,43	0,43	0,39	1,04	1,04	4,65	0,80	0,80	0,36
V2	6,44	6,39	6,39	10,06	0,40	0,40	0,35	1,09	1,09	4,08	0,77	0,77	0,39
V3	6,00	6,50	6,50	10,06	0,10	0,10	0,14	1,71	1,71	4,60	0,58	0,58	0,37
V4	7,33	7,34	7,34	10,06	0,55	0,55	0,63	1,37	1,37	3,08	0,85	0,85	0,66
V5	6,33	6,50	6,51	10,06	0,52	0,52	0,59	1,08	1,08	4,04	0,84	0,84	0,44
V6	8,44	8,19	8,20	10,06	0,39	0,40	0,48	2,15	2,13	2,58	0,75	0,75	0,76
V7	6,44	6,91	6,92	10,06	0,56	0,56	0,66	1,15	1,15	3,89	0,84	0,84	0,47
V8	8,56	9,19	9,10	10,06	0,71	0,68	0,77	1,32	1,35	1,90	0,88	0,88	0,80

F – Calibração Final; M – Calibração momentânea, de acordo com o Anexo I;

P – Calibração com os parâmetros padrões do DSSAT/CANEGRO

Figura 4.36 – Número de folhas verdes (NFV) estimadas (linhas) e observadas (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades

A altura de plantas até a folha +1 (top visible dewlap), Figura 4.37, foi utilizada no ajuste do tempo térmico para alongamento de colmos (CHUPIBASE), esta variável apresentou ótimos índices estatísticos (Tabela 4.13), com R^2 mínimo de 0,97, índice “D” superior a 0,960 e RMSE inferior a 0,16 m, demonstrando que o modelo DSSAT/CANEGRO prediz bem esta variável, o que corrobora com Nassif et al. (2012) que conclui boa predição do modelo para esta variável. Os valores encontrados para o CHUPIBASE foram inferiores ao encontrados por Nassif et al. (2012) entretanto aproxima-se dos valor publicado por Marin (2014) que verificou 547 °Cd para a variedade RB867515.

Tabela 4.13 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável altura de colmos até a folha +1 (top visible dewlap).

VAR	Média (m)				R²			RMSE			"D"		
	Observado	Simulado											
		F	M	P	F	M	P	F	M	P	F	M	P
V1	0,76	0,76	0,76	0,49	0,98	0,98	0,97	0,10	0,10	0,29	0,99	0,99	0,91
V2	0,70	0,68	0,68	0,49	0,99	0,99	0,99	0,11	0,11	0,22	0,99	0,99	0,94
V3	0,85	0,76	0,76	0,49	0,97	0,97	0,97	0,13	0,13	0,37	0,98	0,98	0,87
V4	0,69	0,68	0,68	0,49	0,98	0,98	0,99	0,09	0,09	0,20	0,99	0,99	0,95
V5	0,76	0,76	0,76	0,49	0,98	0,98	0,98	0,09	0,09	0,28	0,99	0,99	0,91
V6	0,86	0,86	0,86	0,49	0,99	0,99	0,94	0,07	0,07	0,39	1,00	1,00	0,85
V7	0,71	0,68	0,68	0,49	0,98	0,98	0,96	0,11	0,11	0,24	0,99	0,99	0,93
V8	0,67	0,62	0,53	0,49	0,99	0,99	0,98	0,10	0,16	0,20	0,99	0,97	0,95

F – Calibração Final; M – Calibração momentânea, de acordo com o Anexo I;

P – Calibração com os parâmetros padrões do DSSAT/CANEGRO

Figura 4.37 – Altura de colmos (m) estimadas (linhas) e observadas (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades

O ajuste dos parâmetros MXLFAREA e MXLFARNO foi realizado a partir dos dados do índice de área foliar verde (IAFv), Figura 4.38. As variedades V2, V3, V4, V5 e V7 apresentaram elevados valores de R^2 (superiores a 0,84) baixo RMSE, mostrando que para estas variedades a parametrização mostrou adequada. Para variedade V6 e V8, apesar do baixo R^2 (inferiores a 0,60) o erro foi baixo, isto é explicado pelo comportamento inconstante entre a primeira e segunda época de amostragem, que pouco variou nos dados observados, Tabela 4.14. Ao contrário, a variedade V1 apresentou R^2 de 0,99, entretanto elevado RMSE ($2,62 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), neste caso o modelo subestimou o IAFv para todas as épocas de amostragem. Nassif et al. (2012) observou RMSE de até $1,43 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ na variedade RB835486.

Tabela 4.14 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para índice de área foliar de folhas verdes (IAFv)

VAR	Média (m² m⁻²)				R²			RMSE			"D"		
	Observado	Simulado											
		F	M	P	F	M	P	F	M	P	F	M	P
V1	4,94	2,24	2,40	4,78	0,99	0,99	0,81	2,83	2,62	1,19	0,52	0,56	0,58
V2	6,09	4,40	4,78	4,78	0,95	0,98	0,64	1,77	1,51	2,09	0,83	0,89	0,56
V3	4,76	3,42	3,73	4,78	0,89	0,83	0,96	1,47	1,43	1,04	0,82	0,85	0,65
V4	5,78	4,56	4,56	4,78	0,87	0,87	0,40	1,47	1,47	2,27	0,90	0,90	0,49
V5	4,37	3,16	3,44	4,78	0,99	0,96	0,88	1,30	1,00	1,51	0,85	0,92	0,52
V6	3,20	3,22	3,38	4,78	0,42	0,60	0,37	0,88	0,75	1,86	0,79	0,87	0,54
V7	4,29	3,76	3,76	4,78	0,99	0,99	0,93	0,57	0,57	1,09	0,96	0,96	0,61
V8	4,97	4,74	4,74	4,78	0,58	0,58	0,60	1,08	1,08	1,25	0,87	0,87	0,52

F – Calibração Final; M – Calibração momentânea, de acordo com o Anexo I;

P – Calibração com os parâmetros padrões do DSSAT/CANEGRO

Figura 4.38 – IAFv, Índice de Área foliar Verde ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) estimados (linhas) e observados (pontos) em condições de casa de vegetação para oito variedades

A variável massa fresca de colmos, Tabela 4.15, apresentou elevado R^2 e índice “D” em todas as variedades, entretanto apenas na variedade V6 o RMSE foi inferior a 10 t ha^{-1} . Como pode ser observado na Figura 4.39, em todas as variedades, os valores estimados pelo modelo foram muito próximos aos observados no início do ciclo, entretanto não houve bom ajuste do modelo a partir da metade do ciclo de cultivo, com exceção das variedades V4, V6 e V7. Este comportamento foi verificado por Marin (2014) no modelo STC na localidade de Piracicaba. Os parâmetros que mais influenciam na estimativa desta variável, de acordo com Nassif (2010) são CHUIBASE e PARCEmax, como foi discutido anteriormente o parâmetro CHUIBASE foi ajustado e obteve bons índices estatísticos, entretanto o PARCEmax a princípio não foi ajustado, utilizando-se de um valor padrão para a estimativa da massa fresca de colmos, isto abre discussão sobre a possibilidade de algumas variedades brasileiras serem mais eficientes na conversão de radiação. A elevação deste parâmetro em 15% (de $9,9$ para $11,4 \text{ g MJ}^{-1}$, nas variedades V1, V2, V3, V4 e V5) resultou, em média, 30% de redução do RMSE. A variedade padrão V8 (NCo376) obteve um RMSE de $28,81 \text{ t ha}^{-1}$, valor superior às 20 t ha^{-1} obtido por Singels & Bezuidenhout (2002).

Tabela 4.15 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável massa fresca de colmos

VAR	Média (t ha ⁻¹)				R ²			RMSE			"D"		
	Obs.	Simulado											
		F	M	P	F	M	P	F	M	P	F	M	P
V1	62,97	59,54	54,26	47,04	0,98	0,98	0,99	6,85	11,63	18,23	0,99	0,97	0,93
V2	66,80	66,06	59,65	47,04	0,95	0,95	0,94	18,56	22,68	33,04	0,96	0,93	0,85
V3	71,33	62,15	56,14	47,04	0,97	0,96	0,94	16,96	22,94	33,04	0,96	0,93	0,84
V4	57,37	66,81	60,31	47,04	0,99	0,99	0,99	11,19	10,06	18,35	0,98	0,98	0,94
V5	58,67	62,06	56,03	47,04	0,95	0,95	0,92	10,55	12,15	20,37	0,98	0,98	0,92
V6	54,33	59,70	68,59	47,04	0,96	0,96	0,95	9,20	15,93	12,11	0,98	0,98	0,97
V7	39,53	54,56	58,55	47,04	0,99	0,99	0,99	15,44	26,70	8,27	0,96	0,92	0,98
V8	64,40	54,37	55,79	47,04	0,95	0,95	0,95	26,63	22,50	30,77	0,90	0,93	0,87

F – Calibração Final; M – Calibração momentânea, de acordo com o Anexo I;

P – Calibração com os parâmetros padrões do DSSAT/CANEGRO

Figura 4.39 – Massa fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) estimados (linhas) e observados (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades

A massa seca de colmo, igualmente à massa fresca, apresentou bons índices estatísticos, com R^2 acima de 0,86 e índice “D” médio de 0,875, entretanto o modelo subestimou esta variável em todas variedades, principalmente ao final do ciclo, exceto na variedade V7, como pode ser observado na Figura 4.40. A estimativa desta variedade foi realizada com parâmetros originais do DSSAT/CANEGRO, ou seja, parâmetros calibrados para a variedade NCo376; com exceção da variedade V3, as demais obtiveram RMSE inferiores a 10 t ha⁻¹, Tabela 4.16, estes valores são superiores aos encontrados por Singles & Bezuidenhout (2002), e próximo aos encontrados por Marin et al. (2011).

Realizou-se outra estimativa da massa seca de colmos, nesta elevou-se em 15% o parâmetro PARCEmax (de 9,9 para 11,4 g MJ⁻¹) e 7 % do parâmetro STKPFMAX (de 0,65 para 0,70 t t⁻¹ base massa seca). Nas variedades V1, V2, V3, V4 e V5, em média, houve redução de 37,6 % no RMSE. Na variedade V6 ajustou-se apenas o STKPFMAX e observou-se redução de 15% do erro (RMSE) na estimativa desta variável. Na variedade V7, que obteve bom ajuste e na variedade V8 (NCo376) não foi realizado calibração para estes parâmetros.

Tabela 4.16 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável massa seca de colmos

VAR	Média (t ha ⁻¹)				R ²			RMSE			"D"		
	Observado	Simulado											
		F	M	P	F	M	P	F	M	P	F	M	P
V1	18,48	15,24	14,74	11,73	0,86	0,86	0,89	5,73	6,16	8,58	0,93	0,92	0,84
V2	17,80	17,15	16,41	11,73	0,97	0,97	0,96	5,15	5,67	9,79	0,96	0,95	0,82
V3	22,85	16,01	15,32	11,73	0,99	0,99	0,99	9,62	10,43	14,54	0,88	0,86	0,73
V4	17,50	17,37	16,62	11,73	0,99	0,99	0,99	2,91	3,45	8,08	0,99	0,98	0,86
V5	16,52	15,99	15,30	11,73	0,99	0,99	0,99	3,10	3,70	7,51	0,98	0,97	0,88
V6	19,01	15,37	17,09	11,73	0,97	0,97	0,97	5,29	3,06	8,80	0,94	0,97	0,83
V7	12,01	13,82	16,79	11,73	0,99	0,99	0,99	1,51	4,11	1,64	0,99	0,95	0,99
V8	16,93	13,75	15,29	11,73	0,99	0,99	0,99	6,35	3,98	7,83	0,91	0,97	0,87

F – Calibração Final; M – Calibração momentânea, de acordo com o Anexo I;

P – Calibração com os parâmetros padrões do DSSAT/CANEGRO

Figura 4.40 – Massa seca de colmos ($t\ ha^{-1}$) estimados (linhas) e observados (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades

A variável biomassa seca da parte aérea, que constitui a soma dos componentes: folha, bainha, desponte, colmo e perfilhos senescentes, apresentou bons índices estatísticos (Tabela 4.17) em todas as variedades, menor R^2 foi de 0,87 (V1) e índice “D” variando de 0,85 e 0,98. O que pode ser observado é que o RMSE superior a 10 t ha^{-1} em todas variedades, com exceção da variedade V7, isto demonstra que apesar da boa correlação o modelo não estimou adequadamente, o que pode ser verificado na Figura 4.41, que demonstra uma subestimativa do modelo em todas as variedades. Para as variedades brasileiras (V1, V2, V3, V4, V5 e V6) este comportamento pode estar relacionado aos parâmetros que PARCEmax e APFMX, que foram mantidos em valores padrões do CANEGRO/DSSAT. O RMSE encontrado na variedade V8 (NCo376) foi alto quando se compara aos dados publicados por Singels & Bezuidenhout (2002), que encontraram RMSE de $6,94 \text{ t ha}^{-1}$ nesta mesma variedade.

Tabela 4.17 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável biomassa seca da parte aérea

VAR	Média (t ha ⁻¹)				R ²			RMSE			"D"		
	Obs.	Simulado											
		F	M	P	F	M	P	F	M	P	F	M	P
V1	33,15	21,78	21,78	23,58	0,87	0,87	0,90	13,40	13,40	12,16	0,85	0,85	0,86
V2	33,15	24,69	24,69	23,58	0,99	0,99	0,98	11,42	11,42	14,40	0,91	0,91	0,83
V3	35,75	22,87	22,87	23,58	0,99	0,99	0,99	14,95	14,95	16,06	0,85	0,85	0,80
V4	31,76	25,01	25,01	23,58	0,99	0,99	0,99	8,55	8,55	11,76	0,94	0,94	0,87
V5	30,95	22,84	22,84	23,58	0,99	0,99	0,99	9,48	9,48	10,84	0,93	0,93	0,88
V6	30,53	21,92	25,49	23,58	0,99	0,99	0,99	9,98	6,05	9,21	0,90	0,97	0,91
V7	23,44	19,86	24,14	23,58	0,99	0,99	0,99	4,14	2,10	2,30	0,98	1,00	0,99
V8	31,11	21,76	26,42	23,58	0,99	0,99	0,99	12,70	7,74	11,84	0,86	0,95	0,87

F – Calibração Final; M – Calibração momentânea, de acordo com o Anexo I;

P – Calibração com os parâmetros padrões do DSSAT/CANEGRO

O aumento 15% no parâmetro PARCEmax (de 9,9 para $11,4 \text{ g MJ}^{-1}$) aliado com o aumento de APFMX em 5% (de 0,88 para $0,92 \text{ t t}^{-1}$, valor máximo indicado por Marin et al. 2011) reduziu, em média, o RMSE em 26 %.

Figura 4.41 – Biomassa seca da parte aérea ($t\ ha^{-1}$) estimados (linhas) e observados (pontos) em condições de casa de vegetação para oito variedades

A variável massa seca da sacarose (Tabela 4.18), que compreende a massa de açúcar por área, obteve alto R^2 , o que já era esperado uma vez que se trata de uma variável acumulativa e com apenas três épocas de amostragem. O índice “D” de Willmott variou de 0,599 (V1) a 0,988 (V7) e RMSE sofreu variação de 0,52 (V7) a 4,42 (V1). Em termos médios, verifica-se que houve bons índices estatísticos, Singels & Bezuidenhout (2002) encontrou RMSE de 2,6 t ha⁻¹, O’Leary (2000) relata valores de 4,93 e 3,30 t ha⁻¹ utilizando o APSIM e 2,5 t ha⁻¹ no QCane. Entretanto observa-se na Figura 4.42 que o modelo subestimou a produtividade de sacarose em todas as variedades – com exceção da variedade V7 – até mesmo na variedade V8 (NCo376) a estimativa não foi adequada.

Assim como nas variáveis anteriores realizou-se outra estimativa da massa seca de sacarose, nesta elevou-se em 15% o parâmetro PARCEmax (de 9,9 para 11,4 g MJ⁻¹), 7 % do parâmetro STKPFMAX (de 0,65 para 0,70 t t⁻¹ base massa seca) e APFMX em 5% (de 0,88 para 0,92 t t⁻¹), e o em 7% o parâmetro SUCA (0,58 para 0,62 t t⁻¹), estas porcentagens de aumento foram baseadas nas calibrações realizadas, nas variedades brasileiras, por Marin (2014), Marin et al. (2011), Nassif et al. (2012). Nas variedades V1, V2, V3, e V5, em média, houve redução de 42,7 % no RMSE, na variedade V4 houve aumento de 5% do RMSE, na variedade V6 ajustou-se apenas o APFMX, STKPFMAX e o SUCA e observou-se redução de 53% do erro (RMSE) na estimativa desta variável. Na variedade V7, que obteve bom ajuste e na variedade V8 (NCo376) não foi realizada calibração para estes parâmetros.

Tabela 4.18 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável massa seca de sacarose

VAR	Média (t ha ⁻¹)				R ²			RMSE			"D"		
	Observado	Simulado											
		F	M	P	F	M	P	F	M	P	F	M	P
V1	8,55	7,39	7,39	4,96	0,99	0,99	0,99	1,41	1,41	3,59	0,91	0,91	0,61
V2	9,15	9,01	9,01	4,96	0,99	0,99	0,99	2,09	2,09	5,23	0,93	0,93	0,69
V3	8,55	8,13	8,13	4,96	0,99	0,99	0,99	1,09	1,09	4,23	0,98	0,98	0,71
V4	7,15	9,20	9,20	4,96	0,99	0,99	0,99	2,30	2,30	2,99	0,89	0,89	0,78
V5	7,00	8,14	8,14	4,96	0,99	0,99	0,99	1,50	1,50	2,99	0,96	0,96	0,78
V6	8,85	7,68	9,43	4,96	0,99	0,99	0,99	1,74	1,21	4,39	0,93	0,97	0,69
V7	5,50	6,40	8,73	4,96	0,99	0,99	0,99	0,93	3,25	0,95	0,99	0,75	0,95
V8	8,15	6,22	8,30	4,96	0,99	0,99	0,99	3,73	2,46	4,61	0,74	0,90	0,71

F – Calibração Final; M – Calibração momentânea, de acordo com o Anexo I;

P – Calibração com os parâmetros padrões do DSSAT/CANEGRO

Figura 4.42 – Sacarose (t ha⁻¹) estimadas (linhas) e observadas (pontos) em condições de casa de vegetação para as oito variedades

Com relação à variável porcentagem de sacarose da massa fresca, expressa em %POL da cana-de-açúcar, observa-se que na estimativa realizada com parâmetros oriundos da variedade padrão NCo 376 (que já estão no modelo), houve elevado R^2 , o índice “D” de Willmott mostra baixa acurácia do modelo nas variedades V1 e V6, Tabela 4.19. Como pode ser observado na Figura 4.43 o modelo subestimou a %POL nas três épocas amostragem. Após a calibração final o modelo apresentou redução em algumas variedades e aumento do RMSE em outras variedades. Nas variedades que ocorreu redução do RMSE esta foi de aproximadamente 42%.

Tabela 4.19 – Média dos valores observados (obs.) e simulados, R^2 , raiz quadrada do erro (RMSE) e índice “D” de Willmott para a variável sacarose da massa fresca (%POL)

VAR	Média (% POL da Cana)				R²			RMSE			"D"		
	Observado	Simulado											
		F	M	P	F	M	P	F	M	P	F	M	P
V1	9,37	9,07	9,07	7,46	0,99	0,99	0,99	0,83	0,83	2,08	0,00	0,00	0,07
V2	9,03	10,04	10,04	7,46	0,99	0,99	0,99	1,03	1,03	1,57	0,60	0,60	0,51
V3	8,10	9,45	9,45	7,46	0,99	0,99	0,99	1,37	1,37	0,70	0,47	0,47	0,70
V4	7,07	10,16	10,16	7,46	0,99	0,99	0,99	3,53	3,53	1,39	0,52	0,52	0,74
V5	7,59	9,45	9,45	7,46	0,99	0,99	0,99	1,92	1,92	0,47	0,61	0,61	0,93
V6	12,04	9,48	10,28	7,46	0,99	0,99	0,99	2,58	1,76	4,59	0,25	0,31	0,14
V7	8,96	7,88	9,86	7,46	0,99	0,99	0,99	1,13	1,08	1,54	0,75	0,71	0,66
V8	7,37	8,45	9,64	7,46	0,99	0,99	0,99	1,86	2,78	1,32	0,64	0,58	0,76

F – Calibração Final; M – Calibração momentânea, de acordo com o Anexo I;

P – Calibração com os parâmetros padrões do DSSAT/CANEGRO

Figura 4.43 – Teor de sacarose aparente da cana-de-açúcar (%POL da cana) em condições de casa de vegetação para as oito variedades

4.4. Conclusões

- Os parâmetros medidos apresentaram grande diferença em relação ao valores padrão do CANEGRO/DSSAT, principalmente CHUIBASE e TT_POPGROWTH;
- Apesar das diferenças encontradas no filocrono, a temperatura base para fenologia de folhas é que pode realmente ter diferença considerável;
- O aumento em 2°C na temperatura base resultou, aproximadamente, 20°Cd de redução no filocrono;
- Apesar de não se ter confirmações de melhor eficiência das variedades brasileiras na conversão de radiação em assimilados, o aumento em 15% do PARCEmax resultou em melhor ajuste das curvas de produtividade;
- As variedades que obtiveram produtividades mais baixas apresentaram os melhores índices estatísticos relacionados a produtividade de massa fresca e seca de colmos;
- A variedade V7 foi que apresentou os melhores índices estatísticos com os parâmetros originais presentes no CANEGRO/DSSAT para variedade padrão (NCo 376);
- No ambiente estudado a média da produtividade máxima foi aproximadamente 140 t ha⁻¹, com exceção da variedade V7.

Referências

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, D. **Crop evapotranspiration: guides for computing crop water requirements** Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ARNOLD, C.Y. Maximum-minimum temperatures as a basis for computing heat units. **Proceedings American Society for Horticultural Science**, Geneva, v.76, 682-692, 1960

AUDE, M.I.S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 241-248, 1993.

BARBOSA, F. S. **Produtividade de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento: Interações entre variedades, lâminas e intensidade do déficit hídrico na fase de maturação**. 2015. 168p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Sistemas

Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

BECKMANN, M.Z.; DUARTE, G.R.B.; PAULA, V.A. de; 2 MENDEZ, M.E.G.; PEIL, R.M.N. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.86-92, jan-fev 2006

BONNETT, G.D. Rate of leaf appearance in sugarcane, including a comparison of a range of varieties. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 25, n. 7, p. 829–834, Dec. 1998.

CAMPBELL, J.A.; ROBERTSON, M.J.; GROF, C.P.L. Temperature effects on node appearance in sugarcane. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 25, n.7, p. 815-818, Dec. 1998.

CHAVES, S.W.P. **Efeito da alta frequência de irrigação e do “mulching” plástico na produção da pimenta ‘Tabasco’ fertirrigada por gotejamento**. 2008. 153p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FOLEGATTI, M.V.; SCATOLINI, M.E., PAZ, V.S.; PEREIRA, A.R.; FRIZZONE, J.A.; Efeito da cobertura plástica sobre os elementos meteorológicos e evapotranspiração da cultura de crisântemo em estufa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.2, p.155-163, 1997.

INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant and Soil**, London, v.8, n.2, p.93–99, Feb. 1991.

INMAN-BAMBER, N.G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p. 41-51, 1994.

MARIN, F.R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos**. 2014. 262p. (Livre Docência.) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MARIN, F.R.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, Dordrecht, v.26, n.1, p.49-63, Mar. 2014.

MARIN, F.M.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v.72, n.1, p.372-386, 2015

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 production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v.103, p.100-110, 2011.

MCMMASTER, G.S.; WILHELM, W.W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 87, n.4, p.291–300, dec. 1997.

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

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE FILHO, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 311–318, 2012.

O’LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, n.2, p. 97-111, Oct. 2000.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

SANTOS, L.L.; SEABRA JUNIOR, S.; NUNES, M.C.M. Luminosidade, temperatura do ar e do solo em ambientes de cultivo protegido. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v.8, n.1, p.83-93, 2010

SEEMANN, J. Greenhouse climate. In: SEEMANN, J.; CHIRKOV, Y. I.; LOMAS, J.; PRIMAULT, B. **Agrometeorology**. New York: Springer, 1979. Chap. 24, p. 165-178.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.78, n.2/3, p 151–164, Nov. 2002.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. **DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module**: scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling, South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

TULLER, S.E.; PETERSON, M.J. The solar radiation environment of greenhouse-grown Douglas-fir seedlings. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 49-65, 1988.

WARRINGTON, I.J, KANEMASU, E.T. Corn growth response to temperature and photoperiod I. seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. **Agronomy Journal**, Madison v.75, n.5, p.749-754, 1983.

5 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE MASSA FRESCA DE COLMOS E SACAROSE PARA UNIDADE AGROINDUSTRIAL RIO CLARO, CAÇU-GO

Resumo

O objetivo neste capítulo foi estimar a produtividade de massa fresca de colmos e a produtividade de sacarose para a região da unidade Agroindustrial Rio Claro em Caçu/GO utilizando três diferentes solos bem como três épocas de plantio/colheita nos cultivos irrigado e sequeiro. As simulações de crescimento de cana-de-açúcar foram feitas para a Unidade Agroindustrial Rio Claro localizada no município de Caçu-GO (latitude 18°33'25" S e longitude 51° 7' 51"W). Para tanto foi utilizado o modelo de simulação CANEGRO/DSSAT versão 4.6.1 parametrizado para oito variedades. Os cenários utilizados nas simulações foram baseados na época de plantio – três datas: 01 de abril (Dia Juliano 91), 01 de julho (Dia Juliano 182) e 01 de outubro (Dia Juliano 274) com suas respectivas colheitas, com aproximadamente 12 meses; três diferentes tipos de solo (Solo 1, 2 e 3), oito variedades (V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8) e utilização da irrigação – irrigado e sequeiro. Foram ainda utilizados 32 anos de plantio/colheita, totalizando 4608 simulações. A maior produtividade (173,9 t ha⁻¹) foi alcançada pela variedade V2 no solo 1 em cultivo irrigado e a menor produtividade de massa fresca (68,4 t ha⁻¹) ocorreu na variedade V7 no plantio de setembro em cultivo sequeiro no solo 3. Em termos percentuais, houve maior redução da produtividade de sacarose do que produtividade de massa fresca quando comparado entre irrigado e sequeiro. No ambiente sequeiro, a época de plantio que coincidiu com o período de chuva na fase de máximo desenvolvimento e restrição na fase de maturação resultou em maiores produtividades de sacarose.

Palavras Chave: Simulação, Irrigação, Sequeiro

Abstract

The objective of this chapter was to estimate the productivity of fresh culms and sucrose productivity in the Cluster production environment Caçu - GO Agroindustrial Company Odebrecht, Caçu – GO using three different soils and three seasons of planting / harvesting in irrigated and rainfed environment. Caçu is localized at latitude 18 ° 33'25 " S and longitude 51 ° 7 '51"W. The CANEGRO / DSSAT, version 4.6.1, was used to simulate. The scenarios used in the simulations were based on the planting season - three dates: 01 April (Julian Day 91), July 01 (Julian Day 182) and October 01 (Julian Day 274) with their harvest, with approximately 12 months; Three different types of soil (soil 1, 2 and 3), eight varieties (V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 and V8), and use of irrigation - irrigated and rainfed. They were still used 32 years of planting / harvest, totaling 4608 simulations. The highest yield (173.9 t ha⁻¹) was achieved by the variety V2 at soil 1 in irrigated. Between treatments irrigated and rainfed, there was a greater reduction in sucrose productivity than productivity of fresh culms. In treatment rainfed, the planting date that coincided rainy season in full development phase and restriction in the maturation phase resulted in higher yields of sucrose.

Keywords: Simulation, Irrigation, Rainfed

5.1. Introdução

O cultivo de cana-de-açúcar consolidou-se ao longo dos anos, principalmente, no estado de São Paulo tornando este o maior produtor de cana-de-açúcar do país. O aumento da demanda por etanol, bem o preço atraente do açúcar no mercado externo impulsionou o setor, mesmo com as dificuldades políticas. A expansão do cultivo que sempre ocorreu nas regiões com boa e regular disponibilidade hídrica passou às regiões caracterizadas por déficit hídrico ao menos em algumas fases do ciclo da cultura. A unidade Agroindustrial Rio Claro da empresa Odebrecht Agroindustrial está localizada em uma região que possui boa precipitação, entretanto tem uma má distribuição ao longo do ano. O déficit hídrico acentuado pode resultar em perdas significativas na produção, tornando o empreendimento inviável financeiramente, por este motivo a utilização de ferramentas que auxiliem nesta tomada de decisão é necessário.

Uma destas ferramentas são os modelos de simulação. Em cana-de-açúcar há diversos modelos já desenvolvidos e vem sendo aprimorados entre outros que estão surgindo. Entre estes modelos existe o modelo CANEGRO, desenvolvido e calibrado primeiro nas condições da África do Sul e que vem sendo aprimorado e calibrado para utilização em variedades brasileiras. Pesquisadores como Barros et al. (2012), Marin et al. (2011), Nassif et al. (2012) já calibraram e/ou testaram o modelo CANEGRO e afirmam que se trata de uma importante ferramenta, entretanto sua utilização torna-se mais precisa quando se utiliza parâmetros ajustados para as condições brasileiras.

Devido a importância das informações sobre massa fresca de colmo e sacarose para expansão de novas áreas da Odebrecht bem como a tomada de decisão quanto à variedade a ser utilizada, objetivou-se neste capítulo estimar a produtividade de massa fresca de colmos e a produtividade de sacarose para a região da unidade Agroindustrial Rio Claro em Caçu/GO utilizando três diferentes solos bem como três épocas de plantio/colheita nos cultivos irrigado e sequeiro com os parâmetros ajustados no capítulo 4 “*Determinação de parâmetros do modelo CANEGRO/DSSAT para diferentes variedades brasileiras*”.

5.2. Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido em virtude da parceria firmada entre a ODEBRECHT Agroindustrial (antiga ETH-Bioenergia), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e a Universidade de São Paulo através do projeto FAPESP 2012/50083-7: *"Produtividade da Água em Biomassa e Energia para Variedades de Cana-de-açúcar em Função dos Níveis de Irrigação: Experimentação e Simulação"*.

As simulações de crescimento de cana-de-açúcar foram feitas para a Unidade Agroindustrial Rio Claro localizado no município de Caçu-GO (latitude 18°33'25" S e longitude 51° 7' 51"W), Figura 5.1. As simulações foram feitas utilizando-se o modelo de simulação CANEGRO, que faz parte do pacote de modelos no sistema computacional DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) versão 4.6.1 (HOOGENBOOM et al.,2015)

Figura 5.1 – Localização geográfica de cidade de Caçu-GO (Fonte: Google Maps e Por Raphael Lorenzeto de Abreu - Image:Goiás MesoMicroMunicip.svg, own work, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1154307>)

5.2.1. Dados meteorológicos

O modelo é “alimentado” com dados meteorológicos diários de temperatura Máxima (°C), temperatura Mínima (°C), radiação solar global ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e precipitação (mm), sendo esses os dados mínimos para realizar as simulações.

As simulações foram realizadas com dados provenientes da estação meteorológica na unidade Rio Claro Odebrecht com série de 2012 a 2015 e dados compilados de estações próximas ao município de Caçu, criando-se uma série de 1985 a 2013, como descrito em seguida.

No município de Caçu-GO não foi encontrada nenhuma estação meteorológica com grande série histórica para realização das simulações, desta maneira foi criada uma “estação sintética” (Estação Sintética de Caçu - GO) a partir de registros de dados das variáveis meteorológicas das estações meteorológicas ou pluviiais, disponíveis no entorno deste município e com registros de dados diários de, no mínimo, 25 anos.

Para a criação da Estação Sintética de Caçu – GO os elementos meteorológicos temperatura e horas de brilho solar (insolação) foram extraídas dos dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), das estações meteorológicas de Jataí – GO (Latitude -17,91 e Longitude -51,71), Rio Verde – GO (Latitude -17,80 e Longitude -50,91) e Paranaíba – MS (Latitude -19,75 e Longitude -51,18).

Como realizado por Maschio (2015), a Estação Sintética de Caçu - GO foi criada através de uma média ponderada dos registros coletados das estações das três cidades citadas anteriormente, em função da distância linear e das diferenças de altitude entre os municípios com dados disponíveis e o município de Caçu – GO.

Considerando a necessidade da radiação solar global, esta foi estimada a partir dos dados de horas de brilho solar (insolação), conforme realizado por Maschio (2015).

Com relação à precipitação pluvial, em escala diária, foi adotado o critério de utilização de dados de estações com menor distância linear. Neste caso, foram utilizados os registros da estação pluvial de Itarumã - GO, com distância aproximada de 38 km da sede do município de Caçu – GO. Estes dados foram extraídos da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), Sistema de Informações Hidrológicas, Versão Web 3.0.

Eventuais dados faltantes foram corrigidos através do módulo “WeatherMan” pertencente ao software *DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)*. Neste módulo é possível estimar os dados faltantes com base em um

algoritmo que considera os demais registros (datas sem falhas) da série histórica (MASCHIO, 2015).

O resumo das médias das variáveis meteorológicas encontra-se na Tabela 5.1, onde se observa que a temperatura máxima tem pouca variação ao longo dos meses; em todo o ano a média da temperatura máxima é superior a 28 °C. Com relação a temperatura mínima, os menores valores ocorreram entre os meses de junho e agosto, período que coincide com a menor incidência de chuvas. A precipitação média anual é de 1447,4 mm, sendo que 75% desta precipitação ocorrem entre meses de novembro e março. Como pode ser observado na Figura 5.2, a maior precipitação (2202,9 mm) ocorreu em 1989. Verifica-se também que de 2009 a 2013 não ocorreu precipitação superior à média, sequência que ainda não tinha ocorrido nesta série histórica.

Tabela 5.1 – Média dos dados meteorológicos da estação Sintética de Caçu – GO

Mês	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Radiação (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	Precipitação (mm)
Janeiro	30,35	20,12	18,48	285,04
Fevereiro	30,64	19,88	18,73	224,79
Março	30,58	19,59	17,91	195,33
Abril	30,43	17,87	18,01	85,06
Maio	28,66	15,16	15,90	46,91
Junho	28,82	13,50	15,19	27,62
Julho	29,41	12,94	16,10	10,41
Agosto	31,67	14,11	18,02	20,29
Setembro	32,52	16,83	18,01	56,98
Outubro	32,34	18,32	19,53	111,32
Novembro	31,00	19,04	19,84	153,47
Dezembro	30,60	19,89	18,65	230,18

Figura 5.2 – Variação da precipitação anual total entre 1985 a 2013 e a precipitação média da estação Sintética de Caçu – GO

Com relação aos dados fornecidos pela Odebrecht Agroindustrial, Tabela 5.2, observa-se que a média das temperaturas é ligeiramente superior ($\sim 2^{\circ}\text{C}$) às temperaturas encontradas na estação sintética de Caçu. Apesar disso, observa-se no geral que a estação sintética representa adequadamente o ambiente em questão. A precipitação medial anual, neste caso, próxima aos 1500 mm é similar ao valor médio encontrado na estação sintética. Entretanto, observa-se, Figura 5.3, que nos anos de 2012 e 2013 a precipitação foi superior à precipitação verificada na estação meteorológica da ANA no município de Itarumã – GO; esta diferença pode resultar em maior produtividade.

Tabela 5.2 – Média dos dados meteorológicos da estação meteorológica da Odebrecht Agroindustrial Unidade Rio Claro

Mês	Tmax ($^{\circ}\text{C}$)	Tmin ($^{\circ}\text{C}$)	Radiação ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	Precipitação (mm)
Janeiro	33,41	21,61	20,68	207,34
Fevereiro	33,12	21,17	21,11	213,60
Março	32,03	21,12	19,28	249,57
Abril	32,13	19,87	17,77	163,24
Maio	30,41	16,37	15,81	45,06
Junho	30,26	15,96	14,44	37,92
Julho	30,56	15,00	15,63	26,88
Agosto	33,05	16,05	18,98	9,78
Setembro	35,24	19,06	19,74	46,78
Outubro	34,70	20,50	20,99	102,12
Novembro	32,64	20,40	19,39	228,14
Dezembro	33,13	21,57	20,24	202,38

Figura 5.3 – Variação da precipitação anual total entre 2012 e 2015 da estação meteorológica da Odebrecht Agroindustrial Unidade Rio Claro, Caçu – GO

5.2.2. Dados edáficos

Com relação aos dados edáficos utilizou-se três diferentes solos. Solo 1: solo utilizado nas parametrizações, série Sertãozinho, cujo os dados físico-hídricos encontram-se na tabela 5.3. Os demais solos, Tabela 5.4 foram baseados em informações físicas dos solos fornecidas pela Odebrecht Agroindustrial, entretanto para utilização do CANEGRO faz-se necessário informações referentes à umidade de saturação, umidade na capacidade de campo, umidade no ponto de murcha permanente, entre outras.

Os valores que dizem respeito à condutividade hidráulica e a densidade foram estimados pelo DSSAT através do módulo Solos denominado “SBuild”. Entretanto, como relatado por Marin et al. (2011) e Vianna e Sentelhas (2014), as funções de pedotransferência do programa, para estimar a curva de retenção de água no solo, estão ajustadas para solos de clima temperado, e não são apropriadas para estimar os valores em solos brasileiros, pois interferem diretamente na simulação do balanço de água no solo e na disponibilidade de água para a cultura. Por este motivo e por se tratarem de solos com características similares às fornecidas pela Odebrecht Agroindustrial utilizou-se os dados da caracterização físico-hídrica presentes em Vianna e Sentelhas (2014).

Tabela 5.3 – Caracterização físico-hídrica do solo 1 (Sertãozinho)

Camada (m)	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_s	CAD (mm)	D_s	D_p	PT (%)	Frações granulométricas		
	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$				$\text{g}.\text{cm}^{-3}$			Areia	Silte	Argila
								%		
0,00 – 0,20	0,227	0,106	0,421	24,20	1,53	2,65	42,30	75,10	7,80	17,10
0,20 – 0,40	0,226	0,098	0,412	25,60	1,50	2,65	43,40	74,50	8,00	17,50
0,40 – 0,60	0,241	0,132	0,374	21,80	1,69	2,64	36,00	74,40	8,60	17,00

θ_{cc} : umidade na capacidade de campo (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de 4,85 kPa). θ_{pmp} : umidade no ponto de murcha permanente (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de 1500 kPa). θ_s : umidade de saturação; CAD: capacidade de água disponível. D_s : densidade do solo. D_p : densidade de partículas do solo. PT: porosidade total do solo.

Tabela 5.4 – Caracterização físico-hídrica do solo 2 e Solo 3

Camada (m)	Solo 2					Solo 3				
	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_s	Frações granulométricas		θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_s	Frações granulométricas	
				Argila	Silte				Argila	Silte
$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$		%		$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$		%				
0,00 – 0,20	0,391	0,277	0,554	50,9	30,3	0,119	0,071	0,431	5,4	3,8
0,20 – 0,40	0,406	0,282	0,548	54,3	34,5	0,126	0,074	0,413	6,6	4,1
0,40 – 0,60	0,398	0,281	0,535	54,2	32,8	0,132	0,075	0,390	7,6	4,4

Fonte: Vianna e Sentelhas (2014)

5.2.3. Dados Fisiológicos

O modelo CANEGRO já dispõe de algumas variedades cadastradas no seu banco de dados, no entanto, estas não são variedades brasileiras. Neste estudo utilizou-se a parametrização das oito variedades conforme Capítulo 4.

5.2.4. Cenários das Simulações

Os cenários utilizados nas simulações foram baseados na época de plantio – três datas: 01 de abril (Dia Juliano 91), 01 de julho (Dia Juliano 182) e 01 de outubro (Dia Juliano 274) com suas respectivas colheitas, com aproximadamente 12 meses; três diferentes tipos de solo (Solo 1, 2 e 3), oito variedades (V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8) e utilização da irrigação – irrigado e sequeiro. Foram ainda utilizados 32 anos de plantio/colheita, totalizando 4608 simulações.

Nos cenários com a utilização da irrigação, a mesma foi programada automaticamente pelo modelo quando atingisse 50% do limite. Quando a umidade atingia o nível crítico aplicava-se a lâmina necessária para voltar à capacidade de

campo. O método de irrigação foi por aspersão e a profundidade de manejo adotada foi de 0,7 m.

As análises de variância das produtividades avaliadas foram analisadas com auxílio do software SISVAR. Para os dados de produtividades utilizou-se o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Análise da produtividade de massa fresca de colmos

A análise de variância para as médias de produtividade foi realizada por variedade considerando os três diferentes solos, três épocas de plantio/colheita e condições irrigadas e não irrigadas (sequeiro). Na tabela 5.5 observa-se que houve diferença altamente significativa ($p < 0,01$) entre os solos, épocas e irrigação, bem como houve interação entre solos e irrigação, épocas e irrigação e interação tripla solos, épocas e irrigação. A produtividade média, independente dos fatores de variação variou de 103,21 a 122,11 t ha⁻¹, com coeficiente de variação inferior a 13% em todas as variedades.

Tabela 5.5 – Resumo da Análise de Variância da produtividade de massa fresca de colmos com valores de F e sua significância das oito variedades

FV	GL	Fc							
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Solo (S)	2	1144,0**	655,4**	795,3**	663,6**	766,4**	985,1**	786,6**	609,9**
Época (E)	2	50,7**	45,6**	73,1**	38,3**	69,8**	23,5**	59,9**	27,0**
Irrigação (I)	1	466,6**	287,8**	332,3**	288,9**	317,7**	403,7**	442,7**	426,0**
S . E	4	0,6 ^{NS}	1,3 ^{NS}	2,0 ^{NS}	1,0 ^{NS}	1,8 ^{NS}	0,8 ^{NS}	1,6 ^{NS}	0,6 ^{NS}
S . I	2	128,3**	50,9**	69,9**	49,2**	66,1**	109,6**	92,6**	68,2**
E . I	2	5,3**	5,4**	7,1**	6,0**	6,3**	7,1**	9,1**	8,7**
S . E . I	4	5,7**	3,7**	5,3**	3,1*	5,2**	3,8**	4,4**	2,6**
CV (%)		12,32	12,48	12,53	12,39	12,62	12,58	12,52	11,99
Média (t ha ⁻¹)		106,86	121,57	116,88	122,11	117,41	104,68	103,28	103,21

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade; * Significativo ao nível de 5% de probabilidade;

^{NS} Não Significativo

Analisando a produtividade ao nível de solo (Tabela 5.6), independente de irrigação e épocas de plantio/colheita verifica-se que o solo 1 foi que obteve as maiores produtividades em todas as variedades, diferenciando significativamente ($p < 0,05$) dos demais solos pelo teste de Scott-Knott. Apesar do solo 1 e solo 2

apresentarem CAD similares (~70 mm) estes possuem umidade da capacidade de campo e ponto de murcha diferentes.

Tabela 5.6 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de massa fresca de colmos (t ha⁻¹) das oito variedades nos três diferentes solos independente de épocas de plantio/colheita e de cultivo irrigado/sequeiro

Solo	V1		V2		V3		V4		V5		V6		V7		V8	
1	143,0	A	152,1	A	149,8	A	150,0	A	137,9	A	132,0	A	124,4	A	126,9	A
2	96,18	B	115,7	B	109,2	B	109,9	B	95,87	B	96,9	B	120,8	B	99,44	B
3	81,42	C	96,92	C	91,65	C	92,3	C	80,24	C	80,9	C	115,3	C	83,29	C

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Com relação ao sistema de cultivo irrigado e sequeiro, verifica-se na Tabela 5.7 que a produtividade média no cultivo irrigado foi significativamente superior, pelo teste Scott-Knott. A produtividade observada no sistema irrigado foi em média 20% maior que a produtividade no sistema em sequeiro. Destaca-se que estes valores não diferem o solo e as épocas de plantio/colheita.

Tabela 5.7 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de massa fresca de colmos (t ha⁻¹) das oito variedades em cultivo irrigado e sequeiro independente do solo e das épocas de plantio/colheita

Irrigação	V1		V2		V3		V4		V5		V6		V7		V8	
SEQ	95,0	B	110,8	B	105,8	B	111,4	B	106,4	B	93,7	B	91,9	B	92,6	B
IRR	118,7	A	132,3	A	128,0	A	132,8	A	128,4	A	115,7	A	114,6	A	113,9	A

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

A produtividade de massa fresca em função das épocas de plantio/colheita encontra-se na Tabela 5.8. Observa-se que o plantio realizado nos meses de abril e julho não apresentaram diferenças significativas, entretanto ambas foram significativamente superiores à produtividade alcançada no plantio realizado no mês de setembro. Lembrando que a colheita, em todas as épocas, foi realizada 12 meses após o plantio.

Tabela 5.8 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de massa fresca de colmos (t ha⁻¹) das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita independente do solo e de cultivo irrigado/sequeiro

Época	V1		V2		V3		V4		V5		V6		V7		V8	
1	111,3	A	124,7	A	122,4	A	124,7	A	122,3	A	106,3	A	107,4	A	104,1	B
2	110,2	A	126,9	A	121,7	A	127,2	A	122,8	A	108,3	A	107,5	A	107,3	A
3	99,07	B	113,1	B	106,4	B	114,4	B	107,1	B	99,48	B	94,94	B	98,19	C

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Como houve interação tripla (Solo x Época x Irrigação) nas tabelas 5.9 e 5.10 encontram-se as produtividades médias das oito variedades em função destes fatores de variação. Como pode ser verificado, somente no solo 3, em algumas situações, não houve diferença significativa entre o irrigado e sequeiro, possivelmente em função da CAD ser baixa (CAD ~30mm). Nos demais solos o desempenho seguiu o resultado da média geral. Assim como verificado na média geral, o solo 1 foi o que proporcionou maiores produtividades em todas as variedades e épocas de plantio/colheita. Em média a produtividade alcançada no solo 1 em relação ao solo 2 foi de 50 t ha⁻¹ maior no cultivo irrigado e 27 t ha⁻¹ em sequeiro.

A maior produtividade (173,9 t ha⁻¹) foi alcançada pela variedade V2 no solo 1 em cultivo irrigado e menor produtividade de massa fresca (68,4 t ha⁻¹) ocorreu na variedade V7 no plantio de setembro em cultivo de sequeiro no solo 3.

Tabela 5.9 – Teste Scott-Knott sobre a produtividade de massa fresca de colmos (t ha⁻¹) das variedades V1, V2, V3 e V4 em função dos três diferentes tipos de solo, épocas de plantio/colheita e irrigação

V1												V2											
Irrigado						Sequeiro						Irrigado						Sequeiro					
Solo 1	E1	171,1	A1	a	A1	123,0	A1	b	A1			E1	173,9	A1	a	A1	133,8	B1	b	A1			
	E2	162,7	B1	a	A2	128,8	A1	b	A2	Solo 1		E2	168,1	A1	a	A2	143,8	A1	b	A2			
	E3	166,4	B1	a	A3	106,0	B1	b	A3			E3	170,8	A1	a	A3	121,9	C1	b	A3			
Solo 2	E1	112,2	A2	a	B1	91,6	A2	b	B1			E1	133,2	A2	a	B1	107,1	A2	b	B1			
	E2	108,8	A2	a	B2	90,7	A2	b	B2	Solo 2		E2	130,3	A2	a	B2	113,2	A2	b	B2			
	E3	94,9	B2	a	B3	78,8	B2	b	B3			E3	113,6	B2	a	B3	96,9	B2	b	B3			
Solo 3	E1	87,9	A3	a	C1	81,9	A3	a	C1			E1	103,9	A3	a	C1	96,3	A3	a	C1			
	E2	87,5	A3	a	C2	82,9	A3	a	C2	Solo 3		E2	105,6	A3	a	C2	100,2	A3	a	C2			
	E3	77,0	B3	a	C3	71,4	B3	a	C3			E3	91,2	B3	a	C3	84,3	B3	a	C3			
V3												V4											
Irrigado						Sequeiro						Irrigado						Sequeiro					
Solo 1	E1	173,7	A1	a	A1	133,4	A1	b	A1			E1	174,3	A1	a	A1	134,8	B1	b	A1			
	E2	167,0	A1	a	A2	139,8	A1	b	A2	Solo 1		E2	168,7	A1	a	A2	143,7	A1	b	A2			
	E3	170,5	A1	a	A3	114,2	B1	b	A3			E3	171,0	A1	a	A3	123,4	C1	b	A3			
Solo 2	E1	128,9	A2	a	B1	104,0	A2	b	B1			E1	133,8	A2	a	B1	106,2	B2	b	B1			
	E2	123,2	A2	a	B2	107,5	A2	b	B2	Solo 2		E2	130,4	A2	a	B2	114,5	A2	b	B2			
	E3	104,4	B2	a	B3	87,3	B2	b	B3			E3	115,1	B2	a	B3	98,2	C2	b	B3			
Solo 3	E1	100,9	A3	a	C1	93,7	A3	a	C1			E1	103,3	A3	a	C1	95,7	A3	b	C1			
	E2	98,9	A3	a	C2	94,1	A3	a	C2	Solo 3		E2	105,4	A3	a	C2	100,5	A3	a	C2			
	E3	84,6	B3	a	C3	77,7	B3	a	C3			E3	93,4	B3	a	C3	85,5	B3	b	C3			

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula com mesma numeração na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Entretanto, E1 = Época de plantio e colheita 1; E2 = Época de plantio e colheita 2; E3 = Época de plantio e colheita 3;

Tabela 5.10 – Produtividade média de massa fresca de colmos (t ha⁻¹) das variedades V5, V6, V7 e V8 em função dos três diferentes tipos de solo, épocas de plantio/colheita e irrigação

V5										V6									
Irrigado					Sequeiro					Irrigado					Sequeiro				
Solo 1	E1	173,6	A1	a	A1	133,6	A1	b	A1	Solo 1	E1	164,5	A1	a	A1	116,2	B1	b	A1
	E2	167,1	B1	a	A2	140,5	A1	b	A2		E2	156,0	B1	a	A2	123,9	A1	b	A2
	E3	170,5	B1	a	A3	115,0	B1	b	A3		E3	159,6	B1	a	A3	107,4	C1	b	A3
Solo 2	E1	128,5	A2	a	B1	104,4	A2	b	B1	Solo 2	E1	109,9	A2	a	B1	85,9	B2	b	B1
	E2	124,3	A2	a	B2	108,5	A2	b	B2		E2	107,1	A2	a	B2	93,8	A2	b	B2
	E3	105,3	B2	a	B3	88,6	B2	b	B3		E3	95,3	B2	a	B3	83,3	B2	b	B3
Solo 3	E1	100,4	A3	a	C1	93,5	A3	a	C1	Solo 3	E1	84,3	A3	a	C1	77,1	B3	b	C1
	E2	101,0	A3	a	C2	95,6	A3	a	C2		E2	86,4	A3	a	C2	82,2	A3	a	C2
	E3	85,0	B3	a	C3	78,3	B3	a	C3		E3	78,3	B3	a	C3	73,0	B3	a	C3
V7										V8									
Irrigado					Sequeiro					Irrigado					Sequeiro				
Solo 1	E1	158,4	A1	a	A1	113,2	B1	b	A1	Solo 1	E1	149,2	A1	a	A1	107,6	B1	b	A1
	E2	148,4	B1	a	A2	120,3	A1	b	A2		E2	142,6	A1	a	A2	116,4	A1	b	A2
	E3	152,4	B1	a	A3	99,5	C1	b	A3		E3	144,5	A1	a	A3	101,2	C1	b	A3
Solo 2	E1	114,4	A2	a	B1	89,7	A2	b	B1	Solo 2	E1	113,5	A2	a	B1	87,3	B2	b	B1
	E2	109,6	A2	a	B2	94,6	A2	b	B2		E2	111,5	A2	a	B2	97,0	A2	b	B2
	E3	95,9	B2	a	B3	77,4	B2	b	B3		E3	101,9	B2	a	B3	85,5	B2	b	B3
Solo 3	E1	87,6	A3	a	C1	81,0	A3	b	C1	Solo 3	E1	87,9	A3	a	C1	79,2	B3	b	C1
	E2	88,9	A3	a	C2	83,4	A3	a	C2		E2	91,1	A3	a	C2	85,5	A3	a	C2
	E3	76,1	B3	a	C3	68,4	B3	b	C3		E3	82,5	B3	a	C3	73,5	B3	b	C3

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula com mesma numeração na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Entretanto, E1 = Época de plantio e colheita 1; E2 = Época de plantio e colheita 2; E3 = Época de plantio e colheita 3;

Entre as Figuras 5.4 e 5.7 encontram-se as curvas de produtividade média de massa fresca de colmos. Observa-se que em condições irrigadas há uma maior distinção entre as épocas no mesmo solo, fato que não ocorre em condições de sequeiro, isto porque o modelo permanece estável em momentos de déficit hídrico, não ocasionando morte das plantas. Após o início das chuvas o modelo responde novamente a água. Como pode ser verificado na comparação entre as épocas 1 e 2 de plantio, o plantio realizado na época 1 (abril) alcança uma determinada produtividade e permanece nesta por um longo período, vindo a encontrar à curva da segunda época de plantio (julho), tendo a partir deste momento comportamento similar. Em condições de sequeiro nota-se também que em algum momento do ciclo ocorre estabilização, o que varia de acordo com a época de plantio. Na época 1 (abril) há um momento de estabilização durante a metade do ciclo, e nas épocas 2 (julho) e 3 (setembro) ocorre mais ao final do ciclo (fase de maturação).

O comportamento verificado neste estudo da estimativa da produtividade de massa fresca corrobora em alguns pontos com Barros (2011). Este autor não verificou morte ou mesmo redução de produção apesar de alguns meses de plantio sofrerem com um estresse hídrico durante diferentes fases do ciclo vegetativo. Neste trabalho observou-se que não ocorreu morte das plantas, sendo esta uma característica do CANEGRO/DSSAT.

A produtividade de massa fresca de colmos foi ainda plotada em gráfico box-plot (Figuras 5.8, 5.9 e 5.10) com as médias dos anos em questão (dados de 1985 a 2015). No solo 1 em condições irrigadas verifica-se que, praticamente, não há dispersão entre os anos, o que não ocorre nos demais solos e nos cultivos em sequeiro. Desconsiderando-se os valores outilers a diferença entre a produtividade máxima e mínima ocorrida ao longo destes anos de simulação foi de aproximadamente 50 t ha⁻¹.

Figura 5.4 – Evolução da produtividade de massa fresca de colmos em função das épocas de plantio/colheita e dos diferentes tipos solos em cultivo irrigado e sequeiro das variedades V1 e V2

Figura 5.5 – Evolução da produtividade de massa fresca de colmos em função das épocas de plantio/colheita e dos diferentes tipos solos em cultivo irrigado e sequeiro das variedades V3 e V4

Figura 5.6 – Evolução da produtividade de massa fresca de colmos em função das épocas de plantio/colheita e dos diferentes tipos solos em cultivo irrigado e sequeiro das variedades V5 e V6

..... S1 - E1
 S1 - E2
 S1 - E3
 S2 - E1
 S2 - E2
 S2 - E3
 S3 - E1
 S3 - E2
 S3 - E3

Figura 5.7 – Evolução da produtividade de massa fresca de colmos em função das épocas de plantio/colheita e dos diferentes tipos solos em cultivo irrigado e sequeiro das variedades V7 e V8

Figura 5.10 – Gráfico box-plot da produtividade de massa fresca de colmos das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita sob cultivo sequeiro e irrigado no solo 3

5.3.2. Análise da Sacarose

A análise de variância das médias da sacarose (t ha^{-1}), assim como na produtividade de massa fresca, foi realizada por variedade considerando os três diferentes solos, três épocas de plantio/colheita e condições irrigadas e não irrigadas (sequeiro). Na tabela 5.11 observa-se que houve diferença altamente significativa ($p < 0,01$) entre os solos, épocas e irrigação, bem como houve interação entre solos e épocas, solos e irrigação, épocas e irrigação e interação tripla entre solos, épocas e irrigação. Não ocorreu interação entre solos e épocas de plantios somente nas variedades V6, V7 e V8 e também não ocorreu interação entre solos, épocas e irrigação na variedade V8. A produtividade média de sacarose, independente dos solos, épocas e irrigação variou de 12,30 a 16,8 t ha^{-1} , com coeficiente de variação inferior a 16% em todas as variedades.

Tabela 5.11 – Resumo da Análise de Variância da produtividade de sacarose com valores de F e sua significância das oito variedades

FV	GL	Fc							
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Solo (S)	2	1139,6**	566,9**	728,4**	575,6**	704,6**	950,2**	864,7**	578,2**
Época (E)	2	45,5**	39,1**	57,7**	34,7**	58,1**	28,9**	52,0**	55,9**
Irrigação (I)	1	636,8**	347,6**	418,1**	353,0**	398,7**	537,2**	671,9**	594,3**
S . E	4	3,0*	4,0**	5,5**	3,4**	4,8**	1,6 ^{NS}	1,2 ^{NS}	0,1 ^{NS}
S . I	2	148,4**	47,6**	70,2**	44,0**	65,9**	126,8**	122,0**	75,6**
E . I	2	8,4**	8,0**	11,0**	9,2**	9,5**	7,3**	9,9**	6,4**
S . E . I	4	5,1**	4,5**	5,8**	4,2**	5,8**	4,1**	2,9*	2,0 ^{NS}
CV (%)		15,3	15,0	15,2	14,8	15,2	15,3	15,2	14,3
Média (t ha^{-1})		13,8	16,7	15,8	16,8	15,9	13,7	12,7	12,3

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade; * Significativo ao nível de 5% de probabilidade;

^{NS} Não Significativo

Analisando a sacarose ao nível de solo (Tabela 5.12), independente de irrigação e épocas de plantio/colheita, verifica-se similaridade com os resultados encontrados na produtividade de massa fresca, nesta variável. Também, o solo 1 foi que obteve os maiores valores de sacarose em todas as variedades, diferenciando significativamente ($p < 0,05$) dos demais solos pelo teste de Scott-Knott.

Tabela 5.12 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de sacarose ($t\ ha^{-1}$) das oito variedades nos três diferentes solos independente de épocas de plantio/colheita e de cultivo irrigado/sequeiro

Solo	V1		V2		V3		V4		V5		V6		V7		V8	
1	19,50	A	21,24	A	20,85	A	21,34	A	20,9	A	18,8	A	17,17	A	15,41	A
2	12,39	B	16,27	B	15,01	B	16,39	B	15,14	B	12,6	B	12,05	B	12,11	B
3	9,498	C	12,67	C	11,62	C	12,76	C	11,74	C	9,66	C	9,03	C	9,32	C

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

A diferença entre o cultivo irrigado e sequeiro é verificada na Tabela 5.13, onde se observa que em todas as variedades há, em média, $4\ t\ ha^{-1}$ a mais de açúcar produzido em condições irrigadas.

Tabela 5.13 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de massa fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) das oito variedades em cultivo irrigado e sequeiro independente do solo e das épocas de plantio/colheita

Irrigação	V1		V2		V3		V4		V5		V6		V7		V8	
SEQ	11,58	B	14,78	B	13,78	B	14,88	B	13,92	B	11,66	B	10,65	B	10,49	B
IRR	16,02	A	18,67	A	17,87	A	18,78	A	17,94	A	15,69	A	14,84	A	14,07	A

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Ao contrário da produtividade de massa fresca, a produção por hectare de sacarose foi significativamente superior quando a cultura foi plantada no mês de julho, Tabela 5.14. Como a colheita foi realizada com um ano após o plantio, a cultura plantada em julho passou por um período de déficit hídrico ao final do ciclo (fase de maturação) isto resultou em aumento da produtividade de açúcar, fato que pode ser comprovado nas Tabelas 5.15 e 5.16. Observa-se neste caso que a diferença de produtividade de sacarose na época 2 em cultivo de sequeiro em relação às épocas 1 e 3 é maior que a diferença de sacarose no ambiente irrigado.

Tabela 5.14 – Teste Scott-Knott sobre a média da produtividade de massa fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita independente do solo e de cultivo irrigado/sequeiro

Época	V1		V2		V3		V4		V5		V6		V7		V8	
1	13,86	B	16,37	B	15,93	B	16,4	B	15,92	B	13,37	B	12,46	B	11,44	C
2	14,79	A	18	A	17,08	A	18,04	A	17,26	A	14,59	A	13,87	A	13,31	A
3	12,74	C	15,82	C	14,46	C	16,06	B	14,6	C	13,06	B	11,91	C	12,1	B

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Nas mesmas Tabelas 5.15 e 5.16, observa-se que a produtividade alcançada no ambiente irrigado foi significativamente superior ao sequeiro em todas as variedades, solos e épocas de plantio, exceção da época 2 no solo 3. Isto demonstra que, apesar da necessidade de déficit hídrico na fase de maturação, o efeito negativo do déficit prolongado ao longo do ciclo é superior ao benefício proporcionado pelo déficit na fase de maturação.

Tabela 5.15 – Produtividade média de sacarose ($t\ ha^{-1}$) das variedades V1, V2, V3 e V4 em função dos três diferentes tipos de solo, épocas de plantio/colheita e irrigação

V1										V2									
Irigado					Sequeiro					Irigado					Sequeiro				
Solo 1	E1	23,0	B1	a	A1	15,0	B1	b	A1	Solo 1	E1	23,6	B1	a	A1	17,0	B1	b	A1
	E2	24,1	A1	a	A2	17,5	A1	b	A2		E2	24,3	B1	a	A2	20,4	A1	b	A2
	E3	24,2	A1	a	A3	13,3	C1	b	A3		E3	25,5	A1	a	A3	16,7	B1	b	A3
Solo 2	E1	14,7	A2	a	B1	11,0	A2	b	B1	Solo 2	E1	18,6	A2	a	B1	13,8	B2	b	B1
	E2	14,9	A2	a	B2	11,7	A2	b	B2		E2	19,2	A2	a	B2	16,1	A2	b	B2
	E3	12,9	B2	a	B3	9,2	B2	b	B3		E3	16,7	B2	a	B3	13,2	B2	b	B3
Solo 3	E1	10,4	A3	a	C1	9,1	A3	b	C1	Solo 3	E1	13,4	B3	a	C1	11,9	B3	b	C1
	E2	10,8	A3	a	C2	9,8	A3	a	C2		E2	14,5	A3	a	C2	13,4	A3	a	C2
	E3	9,2	B3	a	C3	7,7	B3	b	C3		E3	12,3	B3	a	C3	10,5	C3	b	C3
V3										V4									
Irigado					Sequeiro					Irigado					Sequeiro				
Solo 1	E1	23,5	B1	a	A1	16,9	B1	b	A1	Solo 1	E1	23,6	B1	a	A1	17,2	B1	b	A1
	E2	24,5	A1	a	A2	19,6	A1	b	A2		E2	24,3	B1	a	A2	20,3	A1	b	A2
	E3	25,4	A1	a	A3	15,2	C1	b	A3		E3	25,6	A1	a	A3	17,0	B1	b	A3
Solo 2	E1	17,7	A2	a	B1	13,3	B2	b	B1	Solo 2	E1	18,7	A2	a	B1	13,7	B2	b	B1
	E2	17,9	A2	a	B2	15,0	A2	b	B2		E2	19,3	A2	a	B2	16,3	A2	b	B2
	E3	14,9	B2	a	B3	11,3	C2	b	B3		E3	16,9	B2	a	B3	13,4	B2	b	B3
Solo 3	E1	12,8	A3	a	C1	11,4	A3	b	C1	Solo 3	E1	13,3	B3	a	C1	11,9	B3	b	C1
	E2	13,3	A3	a	C2	12,2	A3	a	C2		E2	14,6	A3	a	C2	13,4	A3	a	C2
	E3	10,9	B3	a	C3	9,1	B3	b	C3		E3	12,7	B3	a	C3	10,6	B3	b	C3

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula com mesma numeração na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Entretanto, E1 = Época de plantio e colheita 1; E2 = Época de plantio e colheita 2; E3 = Época de plantio e colheita 3;

Tabela 5.16 – Produtividade média de sacarose (t ha⁻¹) das variedades V5, V6, V7 e V8 em função dos três diferentes tipos de solo, épocas de plantio/colheita e irrigação

V5										V6									
Irrigado					Sequeiro					Irrigado					Sequeiro				
Solo 1	E1	23,5	B1	a	A1	16,9	B1	b	A1	Solo 1	E1	22,0	A1	a	A1	14,2	B1	b	A1
	E2	24,5	A1	a	A2	19,8	A1	b	A2		E2	22,7	A1	a	A2	16,7	A1	b	A2
	E3	25,4	A1	a	A3	15,4	C1	b	A3		E3	23,3	A1	a	A3	13,7	B1	b	A3
Solo 2	E1	17,7	A2	a	B1	13,4	B2	b	B1	Solo 2	E1	14,7	A2	a	B1	10,4	B2	b	B1
	E2	18,1	A2	a	B2	15,2	A2	b	B2		E2	14,7	A2	a	B2	12,5	A2	b	B2
	E3	15,0	B2	a	B3	11,5	C2	b	B3		E3	13,0	B2	a	B3	10,4	B2	b	B3
Solo 3	E1	12,7	A3	a	C1	11,4	A3	b	C1	Solo 3	E1	10,2	A3	a	C1	8,9	B3	b	C1
	E2	13,6	A3	a	C2	12,4	A3	a	C2		E2	10,9	A3	a	C2	10,0	A3	a	C2
	E3	11,0	B3	a	C3	9,3	B3	b	C3		E3	9,7	A3	a	C3	8,2	B3	b	C3
V7										V8									
Irrigado					Sequeiro					Irrigado					Sequeiro				
Solo 1	E1	20,4	A1	a	A1	12,8	B1	b	A1	Solo 1	E1	17,7	B1	a	A1	11,3	B1	b	A1
	E2	21,2	A1	a	A2	15,5	A1	b	A2		E2	18,8	A1	a	A2	14,1	A1	b	A2
	E3	21,2	A1	a	A3	12,0	B1	b	A3		E3	18,7	A1	a	A3	12,0	B1	b	A3
Solo 2	E1	14,1	A2	a	B1	9,9	B2	b	B1	Solo 2	E1	13,3	B2	a	B1	9,2	C2	b	B1
	E2	14,6	A2	a	B2	11,8	A2	b	B2		E2	14,5	A2	a	B2	11,9	A2	b	B2
	E3	12,9	B2	a	B3	9,0	B2	b	B3		E3	13,4	B2	a	B3	10,3	B2	b	B3
Solo 3	E1	9,4	B3	a	C1	8,3	B3	b	C1	Solo 3	E1	9,2	B3	a	C1	7,9	B3	b	C1
	E2	10,6	A3	a	C2	9,4	A3	b	C2		E2	10,9	A3	a	C2	9,7	A3	b	C2
	E3	9,2	B3	a	C3	7,2	C3	b	C3		E3	10,1	A3	a	C3	8,1	B3	b	C3

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula com mesma numeração na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Entretanto, E1 = Época de plantio e colheita 1; E2 = Época de plantio e colheita 2; E3 = Época de plantio e colheita 3;

Assim como na produtividade de massa fresca, realizou-se um estudo da dispersão da produtividade de sacarose nos anos simulados. Verifica-se que no solo 1, quando submetido a irrigação ocorre baixa dispersão da produtividade de sacarose; entretanto, nas demais situações, há uma diferença de aproximadamente 7 t ha⁻¹ entre a máxima e mínima produtividade de sacarose ocorrida entre 1985 e 2015.

Figura 5.11 – Gráfico box-plot da produtividade de sacarose das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita sob cultivo sequeiro e irrigado no solo 1

Figura 5.12 – Gráfico box-plot da produtividade de sacarose das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita sob cultivo sequeiro e irrigado no solo 2

Figura 5.13 – Gráfico box-plot da produtividade de sacarose das oito variedades nas três épocas de plantio/colheita sob cultivo sequeiro e irrigado no solo 3

5.4. Conclusões

- O tipo de solo influenciou significativamente a produtividade de massa fresca de colmos e sacarose;
- Considerando apenas o solo 2, a produtividade máxima foi de 133,8 t ha⁻¹ na variedade V4 em sistema irrigado;
- Nos cultivos em sequeiro, independente da época de plantio, há sempre um momento de estagnação da produtividade de massa fresca de colmos;
- Em termos percentuais, houve maior redução da produtividade de sacarose do que produtividade de massa fresca quando comparados cultivos irrigados e sequeiro;
- No ambiente sequeiro, a época de plantio que coincidiu com o período de chuva na fase de máximo desenvolvimento e restrição na fase de maturação resultou maiores produtividades de sacarose;
- Em todas as variedades a produtividade obtida no sistema irrigado foi significativamente superior à produtividade em sequeiro.

Referências

- BARROS, A.C. **Utilização do modelo CANEGRO para estimativa da produtividade de cana-de-açúcar irrigada em diferentes regiões do Brasil.** 2011. 118p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- BARROS, A.C.; COELHO, R.D.; MARIN, F.R.; MEDEIROS, P.R.F. de; NETTO, A. O. A.; POLZER, D.L. Produtividade da cana-de-açúcar RB83-2847 irrigada em Paranavaí, Paraná. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza-CE, v.6, n. 2, p. 97-105, 2012
- 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.; SHELIA, V.; TSUJI, G.Y. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6.** Prosser: DSSAT Foundation. 2015.
- 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 production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v.103, p.100-110, 2011.
- MASCHIO, R. **Cálculo das vazões de outorga na irrigação de cana-de-açúcar: Influência do critério de irrigação e dos níveis de probabilidade de**

evapotranspiração e precipitação. 2015. 262p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE FILHO, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 311–318, 2012.

VIANNA, M.S.; SENTELHAS, P.C. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 237-246, 2014.

ANEXO I

Sequência de Etapas para calibração manual do CANEGRO/DSSAT

Dear sugarcane modellers on the DSSAT list

We have chosen to reply to the remaining aspects of your query to the DSSAT list as a whole, as this may be useful information for other sugarcane modellers using the DSSAT-Canegro model.

When calibrating the Canegro model, we usually

- Calibrate using well-watered, well-fertilised and well-managed experimental datasets with time-series observations of crop development variables
 - o such as shoot population, green and total leaf counts, stalk length (i.e. TVD leaf height), leaf area index (LAI) and/or fractional interception of photosynthetically-active radiation (FiPAR)
- and biomass accumulation variables
 - o above-ground total dry biomass (ADM), green leaf + meristem dry mass, dead leaf dry mass, stalk dry mass, sucrose mass, and fresh cane yield.
- Try to calibrate one cultivar across several environments simultaneously rather than focus on a single experimental treatment.
- Make most of the changes to the cultivar parameter file (SCCAN046.CUL); we try to avoid making changes to the ecotype file (SCCAN046.ECO)

We recommend making a copy of an existing cultivar parameter set (generally NCo376 as this has historically been our 'reference' cultivar) and then modify this by making changes to the parameter values. Calibration is conducted in two broad phases, firstly by correcting the simulation of timing and canopy cover, and then secondly by adjusting biomass accumulation and partitioning.

Follow these basic calibration steps:

1. Adjust the timing of emergence – set thermal time to emergence - TTPLTNEM (for plant crops) and TTRATEM (for ratoon crops). Compare simulated shoot population with observed (time series) shoot population data to ensure an appropriate thermal time to emergence.
2. Adjust shoot population – the maximum population (MAX_POP), final population (POPTT16), and the thermal time window during which tillers develop (TT_POPGROWTH); if required, the shape of the shoot population development curve can be adjusted either directly by adjusting the POPCF(x) quadratic parameters in the ecotype file, or (preferably) by selecting a pre-existing ecotype (the scientific documentation provides guidance in this regard). Compare simulated shoot population with observed shoot population.
3. Adjust leaf appearance rate – PI1 and PI2 and determine the rates at which leaves appear. Adjust these by comparing simulated leaf tip number to observed leaf tip counts (green and senesced leaves). Then adjust LFMAX to match simulated and observed counts of green leaves. We recommend that you set PSWITCH to 14.
4. Adjust the timing of the start of stalk elongation (CHUPIBASE parameter) by comparing simulated and observed TVD (top visible dewlap) leaf height. There is usually an inflection point when stalks start to elongate.
5. Verify the simulation of the canopy by comparing simulated and observed leaf area index or (preferably) FiPAR. Adjust the maximum leaf area per leaf parameter MXLFAREA if necessary. You may fine-tune by adjusting the leaf number at which maximum leaf area occurs (MXLFARNO).
6. Compare simulated and observed lodging, if these data are available (or even based on anecdotal/plant breeder knowledge of lodging in that cultivar), and if necessary adjust LG_AMBASE. This is the total aboveground fresh mass at which lodging starts. Set this to a high value if lodging is unlikely in this cultivar.
7. If/when the simulation of LAI or FiPAR are acceptable, compare simulated and observed aerial dry mass (ADM). The parameter APFMX adjusts the fraction of biomass allocated to roots and this can be altered if you have reason (i.e. root and ADM mass observations) to do so. It is possible to modify the maximum radiation use efficiency parameter PARCEMax, but only if you are absolutely sure that canopy development is properly calibrated and there are no other yield-limiting factors – either in the simulation (check the water stress output

variables) or in the experimental datasets themselves (soil irrigation/drainage problems, pest and disease damage, uniformity problems, etc). In general, we try not to modify PARCEMax and certainly not by more than 5-10%, unless we have a very good *a priori* physiological reason for doing so.

8. The fraction of biomass allocated to stalks (STKPFMAX) is then adjusted if necessary, by comparing simulated and observed stalk dry mass (STKDM). It is also possible to fine-tune CHUPIBASE on the basis of time-series observations of STKDM.

9. Finally, if simulations of ADM and STKDM are accurate, sucrose accumulation can be adjusted by modifying SUCA (maximum sucrose fraction of dry stalks).

Following this procedure ensures that the parameter values are constrained in reasonably physiologically-sound ways, to a level of precision appropriate to the measurement errors of the underlying dataset observations. We are not experienced with applying GenCalc/GLUE-type methods to Canegro calibration; however, we feel that these optimisers generally work better with fewer parameters (and Canegro has many) and some require prior knowledge of parameter value distributions, which is currently limited as relatively few cultivars have been parameterised for Canegro.

The following documentation will assist with definitions/units for parameters and for providing additional insights:

Scientific documentation (Singels et al., 2008)

http://sasri.sasa.org.za/misc/DSSAT%20Canegro%20SCIENTIFIC%20documentation_20081215.pdf

User documentation (Jones & Singels, 2008)

http://sasri.sasa.org.za/misc/DSSAT_Canegro_USER_doc_disclaimercopyright.pdf

Hope this helps!

Kind regards,
Matthew Jones and Abraham Singels

South African Sugarcane Research Institute (SASRI)