



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA DA
CANA-DE-AÇÚCAR NAS CONDIÇÕES
EDAFOCLIMÁTICAS DO CENTRO-OESTE
GOIANO**

JORDANA MOURA CAETANO

Orientador:

Prof. Dr. Derblai Casaroli

JORDANA MOURA CAETANO

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR
NAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS DO CENTRO-OESTE
GOIANO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para à obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de concentração: Solo e Água.

Orientador:

Prof. Dr. Derblai Casaroli

Co-orientador:

Prof. Dr. José Alves Júnior

Goiânia, GO – Brasil

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

CAETANO, JORDANA MOURA
MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR
NAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS DO CENTRO-OESTE GOIANO
[manuscrito] / JORDANA MOURA CAETANO. - 2017.
cxxv, 125 f.

Orientador: Prof. Dr. DERBLAI CASAROLI; co-orientador Dr. JOSÉ ALVES JÚNIOR.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos (EAEA), Programa de Pós Graduação em Agronomia, Goiânia, 2017.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

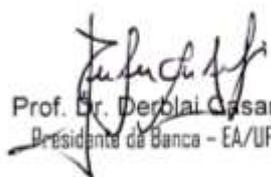
1. Saccharum spp.. 2. análise de crescimento. 3. índice de maturação. 4. condições climáticas do Cerrado. I. CASAROLI, DERBLAI, orient. II. Título.

CDU 635



ATA DE DEFESA DE TESE

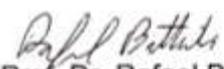
Aos quatorze dias do mês de dezembro do ano de dois mil e dezessete (14.12.2017), às 14h00min, no Mini-auditório do PPGA, da Escola de Agronomia da UFV, reuniu-se a Banca Examinadora, composta pelos membros: Prof. Dr. Derblai Casaroli - Orientador e Presidente da Banca, Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista, Prof. Dr. Rommel Bernardes da Costa, Prof. Dr. Hyrandir Cabral de Melo e Prof. Dr. Rafael Battisti, para a realização da sessão pública da defesa de Tese intitulada: "**Modelagem agrometeorológica da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas do Centro-Oeste goiano**", de autoria de **Jordana Moura Caetano**, discente do curso de **Doutorado**, na área de concentração em **Solo e Água**, do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFV. A sessão foi aberta pelo presidente, que fez a apresentação formal dos membros da Banca e deu início as atividades relativas à defesa da Tese. Passou à palavra a doutoranda que em quarenta minutos apresentou o seu trabalho. Após a exposição, a candidata foi arguida pelos membros da banca. Terminada a fase de arguição, procedeu-se à avaliação da defesa. De acordo com Resolução CEPEC 1403/2016, de 10 de junho de 2016 que regulamenta Programas de Pós-Graduação *Stricto Sensu* na UFV, a Banca Examinadora considerou a Tese "**APROVADA**", com as correções recomendadas, estando integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **DOCTORA** em Agronomia, na área de concentração em **SOLO E ÁGUA**, pela Universidade Federal de Goiás. A doutoranda poderá efetuar as modificações sugeridas pela Banca Examinadora e encaminhar nova versão eletrônica da Tese à Secretaria do PPGA, no prazo máximo de trinta dias após a data da Defesa. A Banca Examinadora recomendou a publicação de artigo(s) científico(s), oriundo(s) dessa Tese, em periódicos de circulação nacional e, ou, internacional, depois de acatadas as modificações sugeridas. Para finalizar, o Presidente agradeceu os membros examinadores, congratulou-se com a doutoranda e encerrou a sessão às 18h25min, para constar, eu Welinton Barbosa Mota, secretário do PPGA, lavrei a presente Ata que depois de lida e aprovada, será assinada pelos membros da Banca Examinadora, em quatro vias de igual teor.


Prof. Dr. Derblai Casaroli
Presidente da Banca - EA/UFV


Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista
Membro - EA/UFV


Prof. Dr. Rommel Bernardes da Costa
Membro - EA/UFV


Prof. Dr. Hyrandir Cabral de Melo
Membro - ICB/UFV


Prof. Dr. Rafael Battisti
Membro - EA/UFV

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Derblai Casaroli pela orientação, incentivo, amizade e contribuição com meu crescimento profissional.

Ao Prof. Dr. José Alves Júnior pelas sugestões, conselhos e amizade.

Ao Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evagelista e ao Prof. Dr. Márcio Mesquita, pelo convívio e por serem, para mim, importantes incentivadores profissionais.

À Usina CentroÁlcool®, nas pessoas do Fábio Aguiar Bonito (Gerente) e Flávia de Paula Braga Côrtes (Chefe do laboratório), por ter disponibilizado a área para a coleta de dados e fornecimento de informações fundamentais para a elaboração desse trabalho.

À Dayanna Teodoro Quirino pela amizade e por todo auxílio prestado nas coletas e análises dos dados e desenvolvimento desse trabalho.

Aos alunos de iniciação científica Anniely, Bárbara, Bruno, Brunna, Larissa, Lucas, Marília, Pedro e Rafael, por auxiliarem na coleta dos dados em campo.

A todos os colegas do PPGA-UFG, Jéssyka, Ana Cláudia, Déborah, Elson, João Maurício, Miguel, Rodolfo e Walter, pelo convívio nos últimos anos.

Ao secretário do PPGA Welinton Barbosa Mota por todo suporte prestado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA) da Universidade Federal de Goiás.

À minha família: minha mãe Maria Elena e meu pai Orlando (*in memoriam*) por todo amor e dedicação; minha irmã Geórgia Bianka por todo amor que temos uma pela outra; minha afilhada Lis, que ainda não nasceu, mas já enche minha vida de alegria; e Samuel, pelo enorme amor, paciência e companheirismo. Amo vocês!

RESUMO GERAL

CAETANO, J.M. **Modelagem agrometeorológica da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas do centro-oeste goiano**, 2017. 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.¹

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e de seus derivados (açúcar e etanol). Devido à crescente demanda por estes produtos, vem sendo observada a constante expansão das áreas com cultivo da cana-de-açúcar no país, principalmente no Estado de Goiás, que atualmente possui a segunda maior área colhida e produção da cultura no país. Considerando esse complexo sistema de produção, do qual envolvem diferentes ambientes de cultivo (clima e solo), a caracterização do crescimento, desenvolvimento e maturação da cana-de-açúcar é um dos aspectos fundamentais para a determinação da qualidade e quantificação da matéria-prima, além auxiliar no planejamento das atividades de colheita. Em regiões tropicais (quentes), como é o caso do centro-oeste goiano, a redução das taxas de crescimento e desenvolvimento e o processo de acúmulo de sacarose nos colmos ocorre, principalmente, em função do déficit hídrico do solo e demanda hídrica atmosférica. A quantificação dessas respostas da cultura ao ambiente pode ser estimada por meio de modelos matemáticos gerados em função de variáveis agrometeorológicas e da água no solo. A modelagem matemática vem sendo utilizada como ferramenta para a estimativa do crescimento, desenvolvimento e produção vegetal e o setor agrícola tem sido beneficiado com estes modelos de previsão de safra. Contudo, a estimativa do acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar ainda demanda de estudos, visto que o conhecimento que se tem dos processos que envolvem a interação das condições agrometeorológicas e as respostas fisiológicas da cultura ainda é insuficiente. Desta forma, os objetivos desse estudo foram: caracterizar o comportamento biométrico e de teor de sólidos solúveis da cana-de-açúcar em resposta às condições de ambiente e solo naturais do centro-oeste goiano, identificar a lâmina de água no solo que gera a redução das taxas de crescimento e desenvolvimento da cultura e que contribui para o acúmulo de sacarose nos colmos, gerar modelos empíricos de determinação de parâmetros biométricos e teor de sólidos solúveis da planta em resposta ao tempo de cultivo e a variáveis agrometeorológicas, elaborar modelos de regressão linear múltipla de estimativa do teor de sólidos solúveis (°Brix) e açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t⁻¹) em função de variáveis agrometeorológicas e lâmina de água no solo e obter os erros de estimativa dos modelos e realização de sua validação. A estrutura do trabalho é a seguinte: após a introdução geral e revisão bibliográfica sobre o tema, no primeiro artigo é apresentada a caracterização e tendência de comportamento do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar para as condições de ambiente e lâmina de água no solo do centro-oeste goiano; e no segundo artigo são apresentados modelos agrometeorológicos gerados para a estimativa do teor de sólidos solúveis (°Brix) e açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t⁻¹) de forma a utilizá-los como alternativa de estimativa em ambientes de cultivo semelhantes às condições em que foram gerados.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., análise de crescimento, índice de maturação, condições climáticas do Cerrado.

¹ Orientador: Prof. Dr. Derblai Casaroli, EA/UFG.

Co-Orientador: Prof. Dr. José Alves Júnior, EA/UFG.

GENERAL ABSTRACT

CAETANO, JM. **Agrometeorological modeling of sugarcane in the soil and climatic conditions of the midwest goiano**, 2017. 125 f. Thesis (Doctorate degree in Agronomy: Soil and Water) School of Agronomy, Federal University of the State of Goiás, Goiânia, 2017.¹

Brazil is the world's largest producer of sugarcane and its derivatives (sugar and ethanol). Due to the growing demand of these products, there has been a constant expansion of land with sugarcane in the country, mainly in the state of Goiás, which currently has the second largest harvest and production crop area countrywide. Considering its complex production system, which involves different growing environments (climate and soil), the characterization of the growth, development and maturation of sugarcane is one of the most fundamental aspects for determining the quality and quantification of the raw material, besides assisting in the planning of harvesting activities. In tropical (hot) regions, such as midwest Goiás, the reduction of growth and development rates and the process of accumulation in soluble solids of stems occurs mainly as a function of soil water deficit and atmospheric water demand. The quantification of these responses from the crop to the environment can be estimated by mathematical models generated as a function of agrometeorological and soil water variables. A mathematical model was used as a tool for estimating growth development and plant production, also the agricultural sector has benefited from these models of crop forecasting. However, the estimate of soluble solids accumulation in sugarcane still requires studies since the knowledge of the procedure that involves interaction of the agrometeorological conditions and the physiological responses of the crop is insufficient. Thus, the objectives of this research were: characterization of the biometric behavior and soluble solids content of sugarcane in response to the natural environment and soil conditions of the midwest region of Goiás, identification of the water depth in the soil that causes the reduction of growth rates and development of the crops that contributes to the accumulation of soluble solids in the stems, creation of empirical models for the determination of biometric parameters and the soluble solids content of the plant in response to the growing time and agrometeorological variables, elaboration of multiple linear regression models of soluble solids content, (°Brix) and total recoverable sugars (ATR, kg t⁻¹) due to the agrometeorological variables and water depth in the soil to obtain the estimation errors of the models and their validation. The following shows the research structure: after the general introduction and bibliographic review on the subject, the first article presents the characterization and trend of behavior of the growth and development of sugarcane for the environment conditions and soil water table in midwest Goiás, and the second article shows agrometeorological models generated for the estimation of soluble solids (°Brix) and total recoverable sugars (ATR, kg t⁻¹) in order to use them as an alternative of estimation in crop environments similar to the conditions that were generated.

Key words: *Saccharum* spp., growth analysis, maturation index, Brazilian Cerrado climate conditions.

¹ Adviser: Prof. Dr. Derblai Casaroli, EA/UFG.

Co-adviser: Prof. Dr. José Alves Júnior, EA/UFG.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	6
GENERAL ABSTRACT.....	7
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS	13
1 INTRODUÇÃO GERAL	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 CANA-DE-AÇÚCAR: HISTÓRICO E IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA	18
2.2 ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR	21
2.3 ASPECTOS CLIMÁTICOS PARA O CULTÍVIO DE CANA-DE-AÇÚCAR ..	24
2.3.1 Radiação solar	24
2.3.2 Temperatura	25
2.3.3 Exigências hídricas	28
2.4 INDICADORES DO ESTRESSE ABIÓTICO NA CANA-DE-AÇÚCAR.....	31
2.5 MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	35
2.5.1 Fisiologia e metabolismo da maturação em cana-de-açúcar	36
2.6 MODELAGEM MATEMÁTICA	39
2.6.1 Modelagem matemática em cana-de-açúcar	41
2.7 REFERÊNCIAS.....	44
3 CARACTERIZAÇÃO DO CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NAS CONDIÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS E DE DÉFICIT HÍDRICO TÍPICOS DO CENTRO-OESTE GOIANO.....	53
RESUMO	53
ABSTRACT	54
3.1 INTRODUÇÃO	54
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	57
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62

3.3.1	Caracterização agrometeorológica e do déficit hídrico do solo de Santo Antônio de Goiás - GO	62
3.3.2	Caracterização do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar	66
3.3.3	Comportamento do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar	79
3.4	CONCLUSÃO	92
3.5	REFERÊNCIAS	93
4	MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E DO DÉFICIT HÍDRICO DO SOLO NO CENTRO-OESTE GOIANO	98
	RESUMO	98
	ABSTRACT	99
4.1	INTRODUÇÃO	99
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	102
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
4.3.1	Caracterização da maturação da cana-de-açúcar em Santo Antônio de Goiás	107
4.3.2	Análise multivariada das variáveis agrometeorológicas e do déficit hídrico	108
4.3.3	Modelagem matemática	111
4.3.4	Validação dos modelos	116
4.4	CONCLUSÃO	118
4.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	125

LISTA DE TABELAS

- Tabela 3.1.** Análise química do solo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 58
- Tabela 3.2.** Parâmetros da equação sigmoidal (a , b , x_0), coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de estimativa, m (EPE), erro quadrático médio, m (EQM), raiz do erro quadrático médio, m (REQM), erro médio absoluto, m (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos valores estimados de altura, m, em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET_0A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), para cana-planta (1), cana-1^asoca (2), cana-2^asoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5)..... 82
- Tabela 3.3.** Parâmetros da equação polinomial de segunda ordem (a , b , y_0), coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de estimativa, $m^2 m^{-2}$ (EPE), erro quadrático médio, $m^2 m^{-2}$ (EQM), raiz do erro quadrático médio, $m^2 m^{-2}$ (REQM), erro médio absoluto, $m^2 m^{-2}$ (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos valores estimados do índice de área foliar, $m^2 m^{-2}$, em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET_0A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), para cana-planta (1), cana-1^asoca (2), cana-2^asoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5).... 84
- Tabela 3.4.** Parâmetros da equação sigmoidal (a , b , x_0), coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de estimativa, kg (EPE), erro quadrático médio, kg (EQM), raiz do erro quadrático médio, kg (REQM), erro médio absoluto, kg (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos valores estimados da massa seca total, kg, em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET_0A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), para cana-planta (1), cana-1^asoca (2), cana-2^asoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5)..... 87

Tabela 3.5.	Parâmetros da equação sigmoideal (a, b, x ₀), coeficiente de determinação (R ²), erro padrão de estimativa, n° nós (EPE), erro quadrático médio, n° nós (EQM), raiz do erro quadrático médio, n° nós (REQM), erro médio absoluto, n° nós (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos valores estimados do número de nós em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET ₀ A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), para cana-planta (1), cana-1 ^a soca (2), cana-2 ^a soca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5).....	89
Tabela 3.6.	Parâmetros da equação polinomial de segunda ordem (a, b, y ₀), coeficiente de determinação (R ²), erro padrão de estimativa, °Brix (EPE), erro quadrático médio, °Brix (EQM), raiz do erro quadrático médio, °Brix (REQM), erro médio absoluto, °Brix (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos valores estimados dos teores de sacarose, °Brix, em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET ₀ A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), para cana-planta (1), cana-1 ^a soca (2), cana-2 ^a soca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5).....	91
Tabela 4.1.	Análise de componentes principais das variáveis déficit hídrico do solo (DH, mm), déficit de saturação de vapor de água no ar (ds, kPa), evapotranspiração de referência acumulada (ET ₀ , mm), excedente hídrico (EXC, mm), graus-dia (GD, °C dia), lâmina de água no solo (L, mm) e precipitação pluviométrica (P, mm), em Santo Antônio de Goiás, Goiás.....	108
Tabela 4.2.	Coeficiente de determinação (R ²), erro padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM), raiz do erro quadrático médio (REQM), erro médio absoluto (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos modelos de estimativa do teor de sólidos solúveis (°Brix) e dos açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t ⁻¹).....	114
Tabela 4.3.	Coeficiente de determinação (R ²), erro padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM), raiz do erro quadrático médio (REQM), erro médio absoluto (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos modelos de estimativa do teor de sólidos solúveis (°Brix) e dos açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t ⁻¹) para as variedades SP80-1842, SP70-1143 e RB86-	

7515 produzidas em diferentes anos-safra (2007/08, 2008/09, 2009/10, 2010/11 e 2011/12), em Santo Antônio de Goiás, Goiás.....

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1.** Variação mensal e desvio padrão da temperatura média do ar, °C (A), precipitação, mm (B), evapotranspiração de referência, mm (C) e déficit hídrico, mm (D) em Santo Antônio de Goiás, Goiás, durante o período de 1983-2004 (Normal) e dos anos de 2013 a 2016..... 63
- Figura 3.2.** Balanço hídrico climatológico, mm, normal (A) e dos anos de 2013 (B), 2014 (C), 2015 (D) e 2016 (E) em Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 65
- Figura 3.3.** Altura, m (A), (C) e (E) e taxa média de altura, m dia⁻¹ (B), (D) e (F) em relação às lâminas de água do solo, mm, ao longo das safras da cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16), respectivamente, em Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 67
- Figura 3.4.** Índice de área foliar, m² m⁻² (IAF) (A), (C) e (E) e taxa média do índice de área foliar m² m⁻² dia⁻¹ (B), (D) e (F) em relação às lâminas de água do solo, mm, ao longo das safras da cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16), respectivamente, em Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 69
- Figura 3.5.** Fitomassa seca da parte aérea (FMS), kg (A), (C) e (E) e taxa média da fitomassa seca da parte aérea, kg dia⁻¹ (B), (D) e (F) em relação às lâminas de água do solo, mm, ao longo das safras da cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16), respectivamente, em Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 71
- Figura 3.6.** Número de nós (A), (C) e (E) e taxa média do número de nós, dia⁻¹ (B), (D) e (F) em relação às lâminas de água do solo, mm, ao longo das safras da cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16), respectivamente, em Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 74
- Figura 3.7.** Teor de sólidos solúveis, °Brix (A), (C) e (E) e taxa média de sacarose, °Brix dia⁻¹ (B), (D) e (F) em relação às lâminas de água do solo, mm, ao longo das safras da cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16), respectivamente, em Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 76

- Figura 3.8.** Alturas, m, observadas nas safras da cana-planta (2013/14), cana-1ªsoca (2014/15) e cana-2ªsoca (2015/16) e estimadas para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5) em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET₀A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), em Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 80
- Figura 3.9.** Índice de área foliar (IAF), m² m⁻² observados nas safras da cana-planta (2013/14), cana-1ªsoca (2014/15) e cana-2ªsoca (2015/16) e estimados para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5) em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET₀A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), em Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 83
- Figura 3.10.** Fitomassa seca total da parte aérea (FMS), kg observadas nas safras da cana-planta (2013/14), cana-1ªsoca (2014/15) e cana-2ªsoca (2015/16) e estimadas para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5) em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET₀A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), em Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 86
- Figura 3.11.** Número de nós observados nas safras da cana-planta (2013/14), cana-1ªsoca (2014/15) e cana-2ªsoca (2015/16) e estimados para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5) em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET₀A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), em Santo Antônio de Goiás, Goiás..... 88
- Figura 3.12.** Teor de sólidos solúveis, °Brix, observados nas safras da cana-planta (2013/14), cana-1ªsoca (2014/15) e cana-2ªsoca (2015/16) e estimados para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5) em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B),

	evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET_0A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), em Santo Antônio de Goiás, Goiás.....	90
Figura 4.1.	Análise de componentes principais e biplot das variáveis déficit hídrico do solo (DH, mm), déficit de saturação de vapor de água no ar (ds, kPa), evapotranspiração de referência (ET_0 , mm), excedente hídrico (EXC, mm), graus-dia (GD, °C dia), lâmina de água no solo (L, mm) e precipitação pluviométrica (P, mm) e do índice de maturação sobre as variáveis, realizada por matriz de correlação, em Santo Antônio de Goiás, Goiás.....	109
Figura 4.2.	Relação dos valores observados e estimados por meio dos modelos de regressão linear múltipla dos (A) teor de sólidos solúveis (°Brix) e dos (B) açúcares totais recuperáveis (ATR, $kg\ t^{-1}$) da cana-de-açúcar, em Santo Antônio de Goiás, Goiás. Reta contínua representa proporção 1:1.....	115
Figura 4.3.	Relação dos valores observados e estimados por meio do modelo de regressão linear múltipla dos (A) teor de sólidos solúveis (°Brix) e dos (B) açúcares totais recuperáveis (ATR, $kg\ t^{-1}$) para as variedades de cana-de-açúcar SP80-1842 (×), SP70-1143 (-) e RB86-7515 (■), em Santo Antônio de Goiás, Goiás. Reta contínua representa proporção 1:1.....	118

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar é um importante produto da balança comercial brasileira, pois o Brasil é o maior produtor mundial da cultura e, também, se destaca como principal produtor e exportador de açúcar e etanol (MAPA, 2016). No Brasil o setor sucroalcooleiro encontra-se em franca expansão em vários Estados, destacando-se a região Centro-Oeste, visto que o Estado de Goiás é o segundo maior produtor de cana-de-açúcar e etanol, além de representar a quarta maior produção de açúcar no país (CONAB, 2017a).

Sabe-se que a produtividade e qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar dependem das condições meteorológicas e da disponibilidade hídrica do solo, e que esta dependência varia em função da fase fenológica da cultura (Cintra et al., 2008). Assim, a considerável demanda pelos produtos derivados da cana-de-açúcar (açúcar e etanol) tem incentivado a realização de pesquisas que buscam compreender o comportamento morfofisiológico da cultura em resposta às condições meteorológicas e de solo do ambiente de cultivo, visando otimizar o manejo nos diferentes estádios fenológicos da cultura.

Para que a cultura da cana-de-açúcar alcance eficiente produção comercial (i.e. potencial de etanol e açúcar) é necessário que o ambiente de cultivo apresente clima quente e úmido, com alta intensidade de radiação solar na fase de crescimento da cultura, e posterior restrição hídrica e, ou, redução térmica, a fim de estimular o armazenamento de sacarose nos colmos (Marin et al., 2009; Cardozo & Sentelhas, 2013).

A sacarose e a biomassa dos colmos e foliar (i.e., parte aérea) são componentes estruturais da cana-de-açúcar, sendo estes condicionantes na produção de açúcar e álcool. A quantificação da biomassa determinará o rendimento da cana-de-açúcar. Assim, ferramentas que auxiliam na estimativa do crescimento são úteis, pois permitem quantificar a produção de biomassa resultante do processo fotossintético, facilitando a compreensão dos mecanismos de resposta da cultura às condições ambientais (Tejera et al., 2007; Charlo et al., 2011). Estas análises podem explicitar padrões de crescimento de uma espécie vegetal, nas diferentes fases de desenvolvimento, possibilitando relacionar as características morfofisiológicas e de produção aos fatores ambientais. A dinâmica do crescimento vegetal pode ser estimada a partir de modelos matemáticos, permitindo o

acompanhamento do acúmulo de matéria seca ao longo do ciclo da cultura (Charlo et al., 2011; Batista et al., 2013).

Assim como na produção de biomassa, a quantificação do acúmulo de sacarose também pode ser realizada por meio de modelos de simulação. Neste sentido, nos últimos anos alguns trabalhos buscaram desenvolver técnicas de previsão do ponto ótimo de maturação (ver Scarpari & Beauclair, 2004; Scarpari & Beauclair, 2009; Cardozo et al., 2015), de modo a auxiliar o planejamento da colheita, visando menor perda de qualidade do produto. Ao que se refere sobre a modelagem da cana-de-açúcar, em termos de grau de maturação, esta estimativa ainda apresenta limitações devido ao insuficiente conhecimento que se tem dos processos que envolvem a interação das condições climáticas e as respostas fisiológicas da cana-de-açúcar (Scarpari & Beauclair, 2009).

Os modelos de previsão da qualidade da matéria-prima, principalmente a previsão da curva de acúmulo de sacarose nos colmos, tornam-se ferramentas importantes na lavoura canavieira. A adoção desses modelos tem por objetivo suprir estimativas de rendimento ao longo da safra, visando caracterizar alternativas de gestão, criação de cenários mais realistas para simulações de análise de decisão e otimizações, aumentando a eficiência de gestão e tomada de decisões estratégicas ao longo da safra (Scarpari & Beauclair, 2009).

Dessa forma os objetivos desse estudo foram:

- a) Identificar a lâmina de água no solo responsável pela paralização ou redução no crescimento da parte aérea e no acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar exposta às condições naturais de ambiente do centro-oeste goiano;
- b) Descrever e quantificar, por meio de modelos matemáticos empíricos, o comportamento do crescimento e desenvolvimento da planta em função de variáveis agroclimáticas e do déficit hídrico do solo;
- c) Quantificar as relações entre variáveis agrometeorológicas, déficit hídrico e maturação da cana-de-açúcar, bem como propor modelos empíricos para a estimativa do teor de sólidos solúveis (°Brix) e do açúcar total recuperável (ATR, kg t^{-1}).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CANA-DE-AÇÚCAR: HISTÓRICO E IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA

É provável que o gênero *Saccharum* tenha sua origem datada antes mesmo de os continentes assumirem sua disposição atual. O gênero é composto por 35 a 40 espécies e tem dois centros de diversidade: o Velho Mundo (Ásia e África) e o Novo Mundo (América) (Cheavegatti-Gianotto, 2011). As espécies *S. officinarum* e *S. spontaneum* são as principais contribuintes para os genomas das cultivares modernas, tendo como origem o Sudeste Asiático (Roach & Daniels, 1987).

A espécie *S. officinarum* tem sido cultivada desde tempos pré-históricos. Acredita-se que seu centro de origem seja a Polinésia e que a espécie foi disseminada por todo o Sudeste Asiático. Por conseguinte, o centro de origem e diversidade da espécie *S. spontaneum* são as regiões mais temperadas da Índia subtropical (Roach & Daniels, 1987).

No Brasil, a introdução da cana-de-açúcar ocorreu por volta de 1502, sendo a primeira colheita comercial da colônia portuguesa. Durante os séculos XVI e XVII o Brasil se tornou o principal produtor e exportador mundial de açúcar bruto, tendo sua produção concentrada na região Nordeste do país. Embora esta fosse uma economia próspera, as dificuldades impostas na comercialização de açúcar no Brasil fizeram com que, em meados do século XVII, os holandeses deixaram o Nordeste brasileiro. Novas economias de plantio de açúcar emergiram rapidamente nas colônias britânica, espanhola e francesa do Caribe, competindo com o Nordeste brasileiro e deslocando sua hegemonia como produtora de açúcar. Como resultado, a região Nordeste entrou em um processo de retração da produção até o fim do século XIX (Furtado, 2007; Dinardo-Miranda et al., 2010).

Somente após a crise de 1929 o governo federal lançou incentivos à economia da agroindústria açucareira por meio da alocação de recursos para a compra de açúcar para os estoques de amortecimento e criação do IAA (Instituto do Açúcar e Alcool) em 1933. As dificuldades com o escoamento da produção de açúcar produzido ao longo da costa do Nordeste se intensificaram durante a Segunda Guerra Mundial e contribuíram para a

consolidação da indústria açucareira em São Paulo (Furtado, 2011). Posteriormente, neste Estado, a indústria canavieira se tornou mais dinâmica devido ao uso de modernas técnicas de produção e à proximidade de um complexo industrial, bem como a criação de importantes instituições de pesquisa com cana-de-açúcar (Dinardo-Miranda et al., 2010).

Atualmente, o setor canavieiro produz, além do açúcar, etanol e energia, assumindo grande importância no cenário econômico mundial (Barnabas et al., 2015). A matriz energética do Brasil tem a cana-de-açúcar como a principal fonte de energia renovável. Cerca de 18% da energia total no Brasil provem do etanol da cana-de-açúcar, sendo a segunda fonte de energia no país (Rodrigues, 2011).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia, China e Tailândia, e sua produção destina-se principalmente à produção de etanol e açúcar (FAO, 2012; MAPA, 2016). No Brasil, safra 2016/17, a área colhida de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroenergética foi de 9.049,2 mil hectares, com aumento de 4,6% em relação à safra anterior. Contudo, houve queda de 5,6% na produtividade, registrando-se valor médio para esta última safra de 72,6 t ha⁻¹, em comparação com 76,9 t ha⁻¹ alcançados na safra 2015/16, sendo esta produtividade recorde para o país (CONAB, 2017a). A expectativa é de que a safra 2017/18 tenha incremento de 1,5% na produtividade devido ao aumento de lavouras recuperadas tanto na Região Norte-Nordeste (7,5%) quanto na Centro-Sul (1,3%) em comparação com a safra 2016/17 (CONAB, 2017b).

Na safra 2016/17 o país produziu 657,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, redução de 1,3% em relação à safra anterior, em que 44,7 milhões de toneladas foram produzidas na Região Norte/Nordeste, enquanto a Região Centro-Sul produziu 612,5 milhões de toneladas. A queda de produção é devido às menores lâminas de precipitação pluviométrica entre abril e setembro de 2016 na Região Sudeste e aos excessos de chuva na Região Centro-Oeste (CONAB, 2017a). Apesar da expectativa de melhoria da produtividade na safra 2017/18, espera-se um decréscimo de 1,7% na produção de cana-de-açúcar em relação à safra anterior. Esta redução é reflexo da redução de 3,7% da área destinada à cultura nos principais estados produtores da Região Centro-Sul (CONAB, 2017b).

O Brasil é também o maior produtor mundial de etanol e açúcar (MAPA, 2016). Devido ao déficit mundial na produção de açúcar em 2016, houve elevação dos preços do produto, o que elevou a representatividade da commodity na produção do setor sucroalcooleiro na safra 2016/17. A produção de açúcar no Brasil, safra 2016/17, foi de

38,7 milhões de toneladas, aumento de 15,5% em comparação à safra anterior (CONAB, 2017a). Estima-se que na safra 2017/18 também haverá incremento na produção de açúcar (1,8%), alcançando 39,4 milhões de toneladas (CONAB, 2017b). Os preços favoráveis do açúcar influenciaram na redução da produção de etanol. Na safra 2016/17 a produção de etanol foi de 27,8 bilhões de litros, redução de 8,7% em comparação com a safra anterior (CONAB, 2017a), com previsão de nova redução (6,1%) na safra 2017/18 (CONAB, 2017b). Contudo, ressalta-se que a participação brasileira no volume total comercializado de etanol atinge de forma direta 53% da quantidade total vendida (MAPA, 2016).

No Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada em diferentes condições edofaclimáticas, sendo que as áreas destinadas ao seu cultivo se estendem por todas as Regiões do país. Na safra 2016/17 a Região Sudeste, principal região produtora de cana-de-açúcar do Brasil, foi responsável por 5700,2 mil ha de área colhida. Nas Regiões Centro-Oeste, Nordeste, Sul e Norte foram contabilizados 1811,5; 866,5; 618,8 e 52,3 mil ha de área colhida, respectivamente. Nesse panorama nacional do setor sucroalcooleiro, a Região Centro-Oeste tem ganhado relevância. Desde a safra 2010/11 a região se consolidou como segunda maior região com área colhida de cana-de-açúcar, sendo observado a cada safra aumento na diferença percentual para as demais Regiões do país (CONAB, 2017a).

Goiás é o segundo maior Estado em área colhida de cana-de-açúcar, detendo 10,6% (962,6 mil ha) da área total do país. Apesar da redução de 3,3% em área colhida na safra 2017/18, estima-se um aumento de 3,9% na produção de cana-de-açúcar resultando em um incremento de 7,5% na produtividade, em relação à safra 2016/17 (CONAB, 2017b). O Estado também é o segundo principal produtor de etanol do país, o qual foi responsável por 15,7% (4,4 bilhões de litros) da produção total, e quarto maior produtor de açúcar do Brasil, com produção de 2,1 milhões de toneladas na safra 2016/17, correspondente a 5,4% da produção nacional (CONAB, 2017a).

Em Goiás as variedades de cana-de-açúcar utilizadas comercialmente ainda são importadas de programas de melhoramento desenvolvidos em outros Estados, principalmente, São Paulo e Minas Gerais (RIDESA, 2010). De acordo com o censo varietal de cana-de-açúcar realizado pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), a variedade mais cultivada no estado de Goiás é a RB86-7515, representando 29,9% das variedades plantadas na região. Esta variedade foi lançada no final da década de 90 e desenvolvida, portanto, no período pré-mecanização de plantio e colheita (IAC, 2016).

Contudo, o censo indicou também que conforme novas variedades estão sendo incorporadas, a RB86-7515 vem perdendo concentração, o que significa que a diversificação genética e materiais mais modernos estão entrando nos campos (Braga Júnior et al., 2017). Na intenção de plantio para 2017, o censo indicou a RB86-7515 como a principal variedade de cana-de-açúcar para Goiás (18%), contudo, com índice menor (-13,3%) do que registrado em outros anos. A CTC-4 se destacou como segunda principal variedade de intenção de plantio em Goiás (11,9%) (Braga Júnior et al., 2017).

A variedade de cana-de-açúcar CTC-4 apresenta maturação média com época de colheita entre os meses de junho a setembro. Caracteriza-se por desenvolvimento vigoroso e bom perfilhamento, além de apresentar média tendência ao florescimento e baixa isoporização. Essa variedade é recomendada para ser cultivada em locais com média para boa condição de fertilidade do solo, se destacando por apresentar alta produtividade e alto teor de sacarose (CTC, 2013).

2.2 ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Os processos fisiológicos variam temporalmente de acordo com os estádios de desenvolvimento da planta, e na cana-de-açúcar estes podem ser classificados em brotação, perfilhamento, crescimento, maturação e, em alguns casos, florescimento (Dinardo-Miranda et al., 2010). A duração de cada fase depende, principalmente, do ciclo da cultura (cana de ano ou cana de ano e meio), sendo que a brotação pode durar de 30 a 60 dias, o perfilhamento de 60 a 90 dias, o crescimento de 180 a 210 dias, enquanto a maturação tem duração de 60 a 90 dias (Dinardo-Miranda et al., 2010; Jadoski et al., 2010).

Nos plantios comerciais a propagação da cana-de-açúcar é vegetativa, por meio de toletes (segmentos de colmos maduros) contendo uma ou mais gemas. Após o plantio dos toletes, se houver disponibilidade de água, inicia-se o processo de ativação das enzimas e hormônios que controlam a divisão e o crescimento celular (Dinardo-Miranda et al., 2010; Jadoski et al., 2010).

Os toletes contêm feixes vasculares (xilema e floema) que promovem a ligação fisiológica entre a brotação e o sistema radicular. Esses feixes vasculares atuam como drenos das reservas armazenadas nas células parenquimáticas, possibilitando a continuidade do crescimento e desenvolvimento da planta (Dinardo-Miranda et al., 2010; Segato et al., 2006). Neste período de desenvolvimento inicial, cerca de 60 dias, as

reservas dos toletes são fundamentais para a evolução do processo de brotação, e essa relação de dependência reduz-se gradativamente à medida que o sistema radicular se desenvolve, aumentando a superfície ativa de absorção de água e nutrientes do solo (Dinardo-Miranda et al., 2010).

Quanto ao sistema radicular, que é do tipo fasciculado, as primeiras raízes originadas após a operação de plantio crescem a partir da região nodal (Jadoski et al., 2010). O umedecimento nos colmos plantados promove a mobilização de enzimas que controlam a divisão, diferenciação e crescimento das células que originam as raízes (Taiz & Zeiger, 2013).

Após a brotação das gemas tem início o perfilhamento. Nesse estágio, as gemas localizadas na base do colmo primário absorvem água do solo e ao emergirem, cerca de 30 dias após a emergência do colmo primário, são observadas novas brotações, denominados colmos secundários, iniciando-se assim o perfilhamento (Aude, 1993). Cada perfilho comporta-se como uma planta independente, pois é composta por raiz, colmo e folhas próprias, embora esteja interligado com os demais perfilhos que compõem a touceira. Com o crescimento dos perfilhos e conseqüente desenvolvimento dos colmos, aumenta a função das raízes quanto à absorção e sustentação da planta (Dinardo-Miranda et al., 2010; Segato et al., 2006).

Assim que ocorre a brotação e posterior emergência do colmo primário há aumento da dominância apical promovida por auxina, fazendo com que as demais gemas não brotem ou atrasem a brotação. A gema apical vegetativa assume o crescimento em altura, resultando em uma sucessão de nós e entrenós, formando o colmo de cana-de-açúcar (Aude, 1993).

Ao caracterizar o crescimento da cana-de-açúcar, tem-se de realçar que esta planta está enquadrada entre as de maior eficiência fotossintética, classificada como planta de metabolismo C4. E, ainda, em função dessa organização de cloroplastos, a fixação de CO₂ processa-se em duas fases, nos cloroplastos das camadas mesofílicas, com a atuação da enzima PEPcase, fixada como ácido oxalacético (C₄H₆O₅), que posteriormente é reduzido a malato (C₄H₄O₅) para então ser transportado para a bainha, onde é descarboxilado, formando CO₂ e piruvato. Tem-se novamente o CO₂, que é refixado e concentrado, aumentando a eficiência fotossintética. A partir daí, entra no ciclo de Calvin, reagindo com a ribulose 1,5 bifosfato para produzir trioses-fosfato, as quais podem ser usadas para a síntese de sacarose e amido. Inicialmente, essa reação é catalisada pela

ribulose 1,5 bifosfato carboxilase/oxigenase que está presente nos cloroplastos e é denominada rubisco. Devido à alta atividade carboxilativa da PEPcase e à eficiência descarboxilativa do malato, há alta concentração de CO₂ nas células da bainha predominando a atividade de carboxilase da rubisco, resultando na inibição da fotorrespiração e por consequência evitando perda de carbono orgânico.

As plantas de metabolismo C4, em relação às plantas de metabolismo C3, são de duas a três vezes mais eficientes no uso da água, apresentam um limite tolerância a alta temperatura em torno de 40 °C e ausência de fotorrespiração. A cana-de-açúcar tem eficiência média de uso 120 litros de água por quilograma de massa seca, enquanto as de metabolismo C3 consomem 450 a 1000 litros de água por quilograma de massa seca. Essa eficiência do uso da água é variável em função das condições edafoclimáticas do local de cultivo, do estado nutricional da planta e, principalmente, da variedade. Além disso, a cana-de-açúcar continua a aumentar a fotossíntese mesmo para um nível de radiação solar considerado saturado para as plantas de metabolismo C3 (Beltrão & Oliveira, 2008).

A maturação dos colmos, quando não há florescimento, representa a última etapa do ciclo fenológico da cana-de-açúcar e determina a qualidade da matéria-prima dos colmos industrializáveis, devido ao intenso acúmulo de sacarose. Ao completar o ciclo, diminui a produção de glicose e frutose, paralisa o crescimento, e inicia a concentração de sacarose até atingir valores aceitáveis pela indústria (Dinardo-Miranda et al., 2010; Segato et al., 2006). A sacarose se desloca da fonte pelo floema e, ao sair deste, sofre uma série de transformações antes de ser armazenada no vacúolo das células dos colmos. Nos tecidos maduros do colmo ocorre declínio da concentração de invertase ácida e aumento de atividade da invertase neutra (Taiz & Zeiger, 2013).

O processo de maturação fisiológica da cana-de-açúcar depende da redução sazonal da temperatura e, ou, a redução da disponibilidade hídrica, a qual retarda a taxa de desenvolvimento vegetativo sem, porém, afetar significativamente o processo fotossintético, de maneira que haja maior saldo de produtos fotossintetizados transformados em açúcares para armazenamento nos tecidos da planta (Cintra et al., 2008; Dinardo-Miranda et al., 2010).

Pode ocorrer ainda na cana-de-açúcar, antes da maturação, o processo de formação da inflorescência. Um dos principais fatores para esse estímulo é o fotoperíodo. Para a maioria das variedades de cana-de-açúcar, a indução floral ocorre com fotoperíodo máximo de doze horas a doze horas e meia (Araldi et al., 2010). Há necessidade, no

entanto, de outras condições climáticas específicas, durante e após a indução, para a iniciação e desenvolvimento da inflorescência. Temperaturas mínimas abaixo de 18 °C e máximas acima de 31 °C, assim como o déficit hídrico no período indutivo, levam, em geral, a um atraso na iniciação e no desenvolvimento das panículas. O florescimento é indesejável quando a finalidade é produção, devido à redução na qualidade da matéria-prima causada pelo processo de isoporização. A isoporização, ou chochamento, decorre da desidratação dos tecidos do colmo que, ao perderem água, adquirem, de forma gradativa, coloração branca (Dinardo-Miranda et al., 2010).

2.3 ASPECTOS CLIMÁTICOS PARA O CULTIVIO DE CANA-DE-AÇÚCAR

As condições meteorológicas são as principais responsáveis pela produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. Estas podem retardar seu ritmo de crescimento e intensificar o acúmulo de açúcar em condições naturais específicas de combinação da temperatura do ar e da umidade do solo (Cintra et al., 2008; Dinardo-Miranda et al., 2010). A radiação solar também influencia no acúmulo de fitomassa e sacarose (Marin et al., 2009). Em todo o ciclo da cultura os fatores ambientais influenciam em sua produtividade qualitativa e quantitativa, sendo que as exigências climáticas variam conforme a fase fenológica (Cintra et al., 2008).

A produção potencial é atingida quando o ambiente de cultivo da cana-de-açúcar apresenta clima quente e úmido, com alta intensidade de radiação solar na fase de crescimento da cultura, e posterior restrição hídrica e, ou, térmica, a fim de estimular o armazenamento de sacarose nos colmos (Marin et al., 2009; Cardozo & Sentelhas, 2013).

2.3.1 Radiação solar

A radiação solar, especificamente a fração visível da energia solar, que contém a radiação fotossinteticamente ativa compreendida na faixa de 400 a 700 nm, tem importância fundamental no processo de fotossíntese (Beltrão et al., 2002). A cana-de-açúcar, de metabolismo fotossintético C4, apresenta altas taxas fotossintéticas (até 100 mgCO₂ dm⁻² h⁻¹), sendo muito eficiente na conversão de energia radiante em energia química (Taiz & Zeiger, 2013; Marin et al., 2009). Em seus estudos, Silva et al. (2012) observaram que o acúmulo de fitomassa seca total da parte aérea da cana-de-açúcar está

relacionado com a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em todo o ciclo da cultura.

A intensidade da radiação disponível para a cultura irá depender da posição solar e de uma série de interações entre a radiação incidente e os elementos vegetais, especialmente as folhas com suas características óticas (reflexão e transmissão), contextualizadas na agrometeorologia nos conceitos de albedo e transmissividade, respectivamente. Estes conceitos encontram-se intimamente relacionados com a disposição espacial, ângulo de inserção foliar e índice de área foliar (Andrade et al., 2014).

Os espectros de radiação vermelho e vermelho distante são responsáveis pelo efeito fotoperiódico na cana-de-açúcar (Rodrigues, 1995), pois estas faixas do espectro de emissão solar regulam a atividade do fitocromo, proteína que controla a floração (Araldi et al., 2010). Para a maioria das variedades de cana-de-açúcar, a indução floral ocorre com fotoperíodo crítico entre 12,0 e 12,5 horas, sendo esta cultura denominada de dias curtos, ou noites longas (Dinardo-Miranda et al., 2010; Araldi et al., 2010).

Cardozo (2012) estudou as relações entre radiação solar (R_g), saldo de radiação (R_n) e fotoperíodo (N) com padrões de maturação de algumas variedades de cana-de-açúcar. Foram observadas relações inversamente proporcionais entre R_g , R_n e N e variáveis que expressam a qualidade da cana-de-açúcar, sendo elas o teor de sólidos solúveis presente no caldo ($^{\circ}\text{Brix}$) e açúcar total recuperável (ATR), considerando-se os períodos de 90 a 150 dias anteriores às amostragens.

Especificamente, a cana-de-açúcar apresenta crescimento satisfatório quando cultivada em áreas expostas à energia solar de 18 a 36 MJ m⁻² dia⁻¹ e fotoperíodo entre 10 e 14 horas. Estas condições também favorecem o perfilhamento da cultura (Monteiro, 2012). Robertson et al. (1999) afirmaram que a redução de 5% da energia radiante interceptada pela área foliar tende a diminuir a biomassa verde total da cana-de-açúcar (ciclo cana-planta) em até 26%.

2.3.2 Temperatura

Para a cultura da cana-de-açúcar, temperaturas do ar abaixo de 25 °C e acima de 35 °C tornam o crescimento da planta lento, sendo o crescimento praticamente nulo em ambientes com temperatura do ar inferior a 18-20 °C ou superior a 38 °C. Valores constantes e acima de 38-40 °C podem afetar o seu desenvolvimento pelo efeito inibitório

de atividades fisiológicas, como abertura de estômatos e troca de CO₂ (Barbieri & Villa Nova, 1977; Doorembos & Kassan, 1994). Quando a temperatura se torna inferior a 0 °C as partes jovens e menos protegidas da cana-de-açúcar (folhas jovens, gema apical e gemas laterais jovens) se congelam (Dinardo-Miranda et al., 2010). Um aspecto importante ainda é o florescimento, que pode comprometer a produtividade. Temperaturas mínimas do ar (noturna) abaixo de 18 °C e temperaturas máximas (diurnas) acima de 30-31 °C afetam o florescimento negativamente, ou seja, inibem (Araldi et al., 2010).

A temperatura do ar interfere na velocidade das reações bioquímicas e na ação de enzimas envolvidas na divisão, diferenciação e crescimento celular. Na cultura da cana-de-açúcar, sob temperaturas baixas, a fotossíntese é limitada pela disponibilidade de fosfato no cloroplasto. Quando trioses fosfato são exportadas do cloroplasto para o citosol, uma quantidade equimolar de fosfato inorgânico é captada via translocadores na membrana do cloroplasto. Se a taxa de utilização de trioses fosfato no citosol decresce, a taxa de absorção de fosfato no cloroplasto é inibida e a fotossíntese torna-se limitada pelo fosfato. Isto ocorre, pois, as sínteses de sacarose diminuem rapidamente com a temperatura, reduzindo a demanda por trioses fosfato e causando a limitação de fosfato observada em temperaturas baixas. Já com o aumento da temperatura, as taxas fotossintéticas caem antes das taxas respiratórias. Nesta condição, a fotossíntese não pode repor o carbono usado como substrato para a respiração. Como consequência do estresse térmico severo, as reservas de carboidratos diminuem e os colmos perdem açúcares (Taiz & Zeiger, 2013).

O processo de maturação fisiológica da cana-de-açúcar depende da redução sazonal da temperatura, a qual retarda a taxa de desenvolvimento vegetativo sem afetar significativamente o processo fotossintético, de maneira que haja maior saldo de produtos fotossintetizados transformados em açúcares para armazenamento nos tecidos da planta (Inman-Bamber & Smith, 2005; Cardozo & Sentelhas, 2013). No caso da maturação, considera-se que temperaturas abaixo de 20 °C retardam a taxa de crescimento da cana-de-açúcar e proporcionam acúmulo de sacarose em seus colmos (Barbieri & Villa Nova, 1977).

Para relacionar o efeito da temperatura do ar com o crescimento e, ou, desenvolvimento de uma cultura, pode-se utilizar o conceito de soma térmica ou graus-dia, que se baseia na resposta da planta à temperatura do ar, destacando a existência de temperaturas basais que controlam o crescimento e desenvolvimento da cultura (Pilau et al., 2011). Tanto o crescimento quanto o desenvolvimento das plantas são reduzidos, ou

nulos, em condições de ambiente que tem suas temperaturas abaixo ou acima da temperatura basal inferior ou superior, respectivamente, mesmo que as demais condições meteorológicas sejam favoráveis (Went, 1953).

A soma térmica expressa de maneira satisfatória o tempo biológico das plantas, tendo como notória vantagem sua simples execução, sendo, assim, utilizada em diversos estudos (ver Inman-Bamber, 1994; Scarpari, 2007; Almeida et al., 2008). A soma térmica, ou constante térmica, é determinada a partir da temperatura basal, geralmente inferior, pois a superior é pouco provável de ser atingida. Posteriormente, obtém-se a soma térmica do ciclo em função da temperatura do ar, possibilitando através destas informações a realização do planejamento da duração do ciclo para locais onde o cultivo não é realizado, mas se dispõe de informações climáticas (Pilau et al., 2011).

Entretanto, não há informações consistentes quanto às temperaturas basais para a cana-de-açúcar, observando variação dos valores para diferentes variedades e locais. De acordo com o levantamento bibliográfico (ver Cardozo & Sentelhas, 2013; Marin & Jones, 2014), para a fase de brotação da cana-de-açúcar a temperatura-base é de 12 °C, no perfilhamento é de 16 °C e para o processo de alongação dos entrenós, 18 °C. Pode-se considerar, para as condições climáticas da região Centro-Sul do Brasil, a temperatura-base constante para todas as fases da cultura de 20 °C. Alguns estudos indicaram que em cultura irrigada o crescimento é paralisado ou não significativo para temperatura média do ar inferior a 18 °C, já para culturas não irrigadas este valor é de 19-20 °C. Isto indica que em condições de estresse hídrico a planta pode sofrer ajustes metabólicos e ter seus limites térmicos alterados. Para a maturação, Scarpari & Beauclair (2004) e Scarpari (2007) apontam para temperatura basal igual a 20 °C, da qual retarda a taxa de crescimento da cana-de-açúcar e induz o acúmulo de sacarose nos colmos.

A cultura da cana-de-açúcar necessita de aproximadamente 200 °C acumulados para finalizar seu estabelecimento, sendo a soma térmica até o final do subperíodo vegetativo igual a 1000 °C, iniciando-se a partir de então a fase de maturação (Scarpari, 2007). Algumas pesquisas relacionaram a soma térmica com o aparecimento de perfilhos. No estudo realizado por Inman-Bamber (1994), a densidade de perfilhos atingiu um pico com 500 °C e com 1500 °C ocorreu o começo da senescência, sendo que a densidade de perfilhos foi constante após 2000 °C acumulado. Almeida et al. (2008) observaram, para a cana-planta, que o pico do perfilhamento ocorreu ao se atingir o acumulado de 800 °C,

com posterior declínio e estabilização com 1600 °C. Os valores encontrados para a cana-soca foram de 350 e 600 °C, respectivamente.

Como a maturação é induzida e acelerada pelo abaixamento da temperatura do ambiente, foi proposto correlacionar a maturação da cana-de-açúcar e a temperatura do ar pela soma dos graus-dia negativos que, no gráfico horário de temperaturas, correspondem à área compreendida entre a reta da temperatura basal e a curva da temperatura na sua porção abaixo da temperatura basal (Scarpari & Beauclair, 2004).

Glover (1971) correlacionou as temperaturas mínimas média do ar com o teor de sacarose da cana-de-açúcar nos três últimos meses antes da colheita e observou que a redução da temperatura do ar foi acompanhada de elevação do teor de sacarose no colmo da planta. Scarpari & Beauclair (2004) associaram os graus-dia negativos de cinco meses anteriores com a maturação e concluíram que o frio excessivo, em torno de 9 °C, prejudica a maturação, com a hipótese de que esta temperatura do ambiente influencia a viscosidade da seiva no floema, o que interfere no transporte de sacarose para o seu armazenamento.

Du et al. (1999) investigaram o comportamento do mecanismo fotossintético da cana-de-açúcar em resposta à baixa temperatura (10 °C). Os resultados indicaram que após 52 h de exposição à temperatura de 10 °C pode ocorrer redução de até 50% da taxa fotossintética da cana-de-açúcar, observando-se, também, comportamento similar da condutância estomática. Ainda, segundo os autores, após 4 h de exposição da cana-de-açúcar a temperatura de 10 °C houve redução na condutância estomática, sendo esta observada de até 93% (de 0,099 para 0,006 mol m⁻² s⁻¹).

2.3.3 Exigências hídricas

A necessidade hídrica da cana-de-açúcar encontra-se na faixa de 1500 a 2500 mm distribuídos de maneira uniforme durante o desenvolvimento (Doorenbos & Kassam, 2000). A umidade do solo pode afetar cada uma das fases fenológicas da cana-de-açúcar, pois a água tem papel fundamental nos processos bioquímicos que ativam a brotação, que influenciam no número de perfilhos e no acúmulo de fitomassa (Marin et al., 2009). O déficit hídrico no solo pode prejudicar ou impedir esses processos e isso depende da intensidade e da duração do período de déficit (André et al., 2010).

Em áreas tropicais, onde a temperatura não limita o crescimento, a maturação da cana-de-açúcar é induzida, principalmente, pela exaustão da água armazenada no solo

(André et al., 2010), ou ainda, pela ocorrência de déficit hídrico. O déficit hídrico do solo afeta o status hídrico da planta, a qual influencia a taxa de fotossíntese ocasionando severa redução na síntese de carboidratos (Taiz & Zeiger, 2013), além da redução do crescimento da parte aérea (Silva et al., 2008). Com isso, há aumento no conteúdo de sacarose, devido à reduzida demanda de fotoassimilados nas regiões meristemáticas (Taiz & Zeiger, 2013). Sendo assim, durante o período de maturação, o déficit hídrico pode ser desejável.

Contudo, o déficit hídrico pode limitar a produção de sacarose (Silva et al., 2008). Estima-se, para um solo com capacidade de água disponível igual a 100 mm, que uma seca superior a 130 mm nos meses que antecedem a colheita influenciam negativamente o acúmulo de sacarose nos colmos (Scarpari & Beauclair, 2004). Inman-Bamber (2004) indicou que o déficit hídrico maior que 120 mm afeta o acúmulo de fitomassa nos colmos, enquanto o acúmulo de sacarose é afetado com déficit hídrico superior a 145 mm.

O crescimento da planta e a produção final estão intimamente correlacionados com a evapotranspiração da cultura. A base fisiológica para isso é que os processos de transpiração e de fotossíntese na planta utilizam-se dos estômatos (Taiz & Zeiger, 2013). Há entre os dois processos uma relação direta, em que a redução na transpiração é acompanhada por redução na fotossíntese da planta.

Gonçalves et al. (2010) avaliaram o comportamento das taxas transpiratórias e de fotossíntese líquida, em casa-de-vegetação, de quatro variedades de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico severo (0 a 20% da água no solo disponível para a cultura) durante a fase inicial de crescimento vegetativo e verificaram que o aumento do estresse hídrico reduz tanto a transpiração foliar (66,94%) quanto a fotossíntese líquida (78,34%). Du et al. (1998) observaram que na cana-de-açúcar exposta ao estresse hídrico moderado (potencial hídrico foliar de até -0,9 MPa) a redução da fotossíntese é devida à redução da condutância estomática.

Para a cana-de-açúcar, a adequada disponibilidade de água no solo durante o período de crescimento vegetativo é muito importante para obtenção de elevadas produtividades (Machado et al., 2009), visto que este desenvolvimento é diretamente proporcional à água transpirada. A ocorrência de déficit hídrico durante o período de estabelecimento da cultura e início do desenvolvimento vegetativo afeta a produção de fitomassa e o rendimento de sacarose (Inman-Bamber & Smith, 2005; Machado et al., 2009). No período vegetativo, o déficit hídrico reduz tanto o alongamento dos colmos, em

torno de 60%, quanto seu diâmetro, de 55 a 75% (Ecco et al., 2014) e também ocorre redução de, cerca de, 35% na fitomassa e de 25% nos sólidos solúveis (Machado et al., 2009).

Em condições de sequeiro, no Centro-Sul do Brasil, o plantio de cana-de-açúcar de ano é realizado nos meses de outubro e novembro, e da cana-de-açúcar de 18 meses é, normalmente, realizado entre os meses de janeiro e abril, períodos em que há disponibilidade de água no solo (Cintra et al., 2008). Porém, podem ocorrer períodos de veranicos, que podem prejudicar as fases de brotação, perfilhamento e crescimento vegetativo. Nesta situação, em veranico curto, o armazenamento de água e de nutrientes nos toletes plantados pode proporcionar a manutenção e a sobrevivência das gemas e dos brotos recém-emitados (Dinardo-Miranda et al., 2010).

No Cerrado do centro-oeste, onde se encontram regiões tradicionais de cultivo da cana-de-açúcar, o total anual de precipitação está entre 1000 e 1600 mm, com chuvas razoavelmente bem distribuídas, e inverno com pouca disponibilidade hídrica, sendo recomendado o uso da irrigação, visando melhorar a rebrota e o estabelecimento da cultura (Cintra et al., 2008). Estima-se que haja um retorno de 1,0 t de açúcar para cada 900 a 1000 t de água usada, sendo essa eficiência mais elevada no caso de lavouras irrigadas e mais baixa e variável nas lavouras sem irrigação (Cintra et al., 2008; Dinardo-Miranda et al., 2010). Carvalho et al. (2009), estudando cana-de-açúcar irrigada, obtiveram produtividades de açúcar estimadas de 9,68 a 15,29 t ha⁻¹ e produtividades de álcool estimadas entre 6,89 a 10,88 m³ ha⁻¹ para as lâminas totais variando de 775 a 1168 mm, respectivamente.

Estudos também investigaram o consumo de água pela cana-de-açúcar e sua resposta em termos de produção e produtividade. Campbell et al. (1960) correlacionaram o consumo hídrico da cana-de-açúcar com produção de fitomassa seca e concluíram que para produção de 1 g de fitomassa seca são necessários 50 g de água. Carvalho et al. (2009), com lâminas totais de água entre 775 a 1168 mm, obtiveram produtividades em colmos de 68,44 a 103,09 t ha⁻¹, respectivamente, para cana-de-açúcar irrigada. Em geral, pode-se considerar que boas produtividades de cana-de-açúcar, em condições de sequeiro nos trópicos úmidos, são da ordem de 70 a 100 t ha⁻¹ e em sistema irrigado a produtividade é superior a 100 t ha⁻¹ (Doorenbos & Kassam, 2000).

2.4 INDICADORES DO ESTRESSE ABIÓTICO NA CANA-DE-AÇÚCAR

O estresse abiótico pode ser definido como um fator externo que exerce influência desvantajosa sobre a planta e que induz mudanças e respostas em todos os níveis funcionais do organismo (Taiz & Zeiger, 2013). As variações climáticas frequentes e extremas têm sido os maiores desafios para a manutenção da produção agrícola e contra as perdas da produtividade (Endres et al., 2010).

Para a cana-de-açúcar cultivada sob as condições climáticas brasileiras, estresses abióticos como o déficit hídrico e temperaturas extremas são responsáveis por maiores danos à produção (Cintra et al., 2008). Expostas a condições de estresse, as plantas estimulam mecanismos integrados para sua sobrevivência dos quais ocorrem em todos os níveis de organização: anatômico, morfológico, celular, bioquímico e molecular e, por consequência destes, passam por eventos como a aclimatação e a adaptação (Taiz & Zeiger, 2013).

Quando submetida ao estresse abiótico, a cana-de-açúcar apresenta algumas alterações morfofisiológicas (Inman-Bamber & Smith, 2005), podendo-se citar: diminuição da condutância estomática (Du et al., 1998), enrolamento da folha (Machado et al., 2013), redução da área foliar (Machado et al., 2013), redução da transpiração (Gonçalves et al., 2010; Machado et al., 2013) e redução da fotossíntese (comprometimento das etapas fotoquímicas e bioquímicas) (Machado et al., 2013).

Quando o estresse é causado pelo déficit hídrico, os vegetais fecham os estômatos como resposta contra a desidratação imediata. Sob tais condições, o estômato fechado reduz a transpiração da área foliar. De acordo com Trentin et al. (2011), a taxa de transpiração diária da cana-de-açúcar, sob condições de estresse hídrico severo ($-1.500 < \Psi_{\text{solo}} < -1.100$ kPa) é, aproximadamente, 73% inferior em relação a plantas cultivadas sob plena disponibilidade de água.

O processo de redução da transpiração foliar ocorre em resposta ao ácido abscísico (ABA). Na presença de luz, os transportadores de membrana bombeiam de forma ativa potássio para o interior das células-guarda e este processo leva a um aumento da pressão osmótica dessas células que passam, portanto, a absorverem mais água ficando túrgidas, o que leva a abertura dos estômatos. Em condições de déficit hídrico, o ABA, que é sintetizado continuamente em taxas baixas nas células do mesófilo, ao entrar nas células-guarda, inibe a ação dos transportadores de membrana e, conseqüentemente, o transporte

ativo do potássio. Isto faz com que as células-guarda deixem de ser túrgidas, o que ocasiona o fechamento dos estômatos. Ainda, o fechamento estomático também pode ser causado pelo ABA sintetizado nas raízes e transportado, via xilema, para as folhas (Taiz & Zeiger, 2013).

Gonçalves et al. (2010) constataram que diferentes variedades de cana-de-açúcar, durante sua fase inicial de crescimento vegetativo, apresentaram condutância estomática em torno de $0,12 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ quando submetidas a condições hídricas satisfatórias, sendo que sob a ocorrência de estresse (0 a 20% da água no solo disponível para a cultura) este valor foi de $0,05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Machado et al. (2009) avaliaram a condutância estomática de duas variedades de cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas da cultura e tiveram como resultados na fase de crescimento inicial os valores médios de $0,20$ e $0,05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para a cana-de-açúcar cultivada em solo próximo à capacidade de campo (com umidade de $30,7 \pm 1,2\%$) e em déficit hídrico (com umidade de $15,9 \pm 0,9\%$), respectivamente. No máximo crescimento, a condutância estomática foi cerca de $0,13 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o solo na capacidade de campo e $0,07 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em déficit hídrico (umidade de $17,6 \pm 0,3\%$) e na fase de acúmulo de sacarose estes valores foram de $0,20 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (capacidade de campo) e $0,04 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($18,1 \pm 0,8\%$ de umidade). Resultados semelhantes foram constatados em cana-de-açúcar exposta a baixa temperatura noturna ($12 \text{ }^\circ\text{C}$) (Machado et al., 2013).

Quando o déficit hídrico é severo, ele reduz tanto a fotossíntese (pois ocorre desidratação de células do mesofilo, além da redução da assimilação de CO_2) quanto o consumo de assimilados nas folhas em expansão, tendo a cultura como resposta a limitação da expansão foliar. Como consequência indireta ocorre a diminuição da quantidade de fotossintatos exportados das folhas, pois, como o transporte do floema depende do turgor, a redução do seu potencial hídrico durante o estresse pode inibir o movimento de assimilados (Taiz & Zeiger, 2013).

Ecco et al. (2014), estudando respostas biométricas de duas variedades de cana-de-açúcar (cana-planta), como análises até 95 dias após o plantio, constataram que o déficit hídrico (umidade do solo de 20 a 40% da capacidade de campo) produz redução da parte aérea total em média de 83%. Sendo que esta redução da fitomassa total da parte aérea ocorre em resposta à paralização de crescimento do colmo e redução do índice de área foliar da cana-de-açúcar (Silva et al., 2012).

Quanto a assimilação de CO₂, Machado et al. (2009) afirmam que ocorre redução da assimilação de CO₂ na cana-de-açúcar em consequência do déficit hídrico (cerca de 56% da capacidade de campo), sendo em média de 58% na fase de crescimento inicial da cultura, de aproximadamente 75% na fase de máximo crescimento e 89% na fase de acúmulo de sacarose.

O déficit hídrico também afeta o desenvolvimento do sistema radicular, sendo que as raízes crescem preferencialmente na direção de camadas de solo que permanecem úmidas. Com a ocorrência do déficit hídrico, as camadas superficiais do solo são, geralmente, as primeiras a apresentarem baixas quantidades de água. Assim, quando a água é esgotada nas camadas superficiais, há perda de raízes superficiais e proliferação de raízes profundas. Contudo, estresse hídrico severo inibe o crescimento radicular e intensifica a morte do sistema radicular (Taiz & Zeiger, 2013). Ecco et al. (2014) observaram redução média de 78,5% da massa radicular da cana-de-açúcar quando exposta ao déficit hídrico (20 a 40% da capacidade de campo).

As respostas dos vegetais ao déficit hídrico incluem muitas vezes alterações bioquímicas em nível celular. O acúmulo intracelular de solutos osmoticamente ativos em resposta às condições estressantes de baixa disponibilidade de água é um importante mecanismo desenvolvido pelas plantas (Taiz & Zeiger, 2013). Este mecanismo, denominado ajuste osmótico, é verificado na cana-de-açúcar (Carlin et al., 2009; Gimenes et al., 2013), sendo considerado um dos mais eficazes para manutenção da turgescência celular, permitindo principalmente a manutenção da abertura estomática e da fotossíntese sob condições de baixo potencial hídrico no solo uma vez que possibilita que a planta extraia a água retida mais firmemente nos microporos do solo ($\emptyset < 30 \mu\text{m}$). Um dos principais solutos orgânicos sintetizados e acumulados é o aminoácido prolina (Silva et al., 2009; Taiz & Zeiger, 2013). Gimenes et al. (2013), em seus estudos, observaram que o teor de prolina acumulado em variedades de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico (por meio de supressão da rega) foi cerca de $1 \mu\text{mol g}^{-1}$ e de $0,233 \mu\text{mol g}^{-1}$ para planta em boas condições hídricas, com umidade do solo na faixa de 65 a 75% da capacidade de campo. Carlin et al. (2009) também constataram aumento da concentração de prolina em tecidos foliares de plantas de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico, contudo, concluíram que o acúmulo deste aminoácido não impediu a redução de matéria seca da planta em resposta ao estresse.

Sob condições de estresse hídrico, as plantas tendem a apresentar temperatura de dossel mais elevada quando comparada às cultivadas em condições hídricas satisfatórias (Testi et al., 2008). A temperatura foliar da cana-de-açúcar tem relação com o processo de transpiração, sendo que à medida que a temperatura do ar aumenta há uma redução na temperatura foliar devido à dissipação de energia na forma de calor latente, resultando em temperatura do ar superior à temperatura foliar (Trentin et al., 2011). Sabe-se que o estresse hídrico associado ao aumento de temperatura foliar resulta em estresse térmico (Taiz & Zeiger, 2013), caso haja redução da transpiração.

Vieira et al. (2014), em estudo com cana-de-açúcar irrigada, indicaram que a temperatura foliar foi próxima à temperatura do ar (diferença entre as temperatura inferior a 0,5 °C) nos tratamentos que receberam as maiores lâminas (100 a 150% da ETc), e que as plantas apresentaram temperaturas superiores à do ambiente, chegando a 6,35 °C de diferença, à medida que se reduziu o suprimento hídrico. Trentin et al. (2011), em estudo realizado em casa de vegetação com cana-de-açúcar, sob ação de estresse hídrico, a temperatura foliar apresentou valores de 6,6 °C acima da temperatura ambiente, sendo esta resposta reflexo da redução de até 74% da transpiração vegetal.

Ligados à ocorrência de déficit hídrico, a demanda atmosférica e o potencial matricial do ambiente em que a planta se encontra definem o seu estado energético, além de interferirem na densidade e distribuição radicular e em processos fisiológicos (Silva et al., 2003). Portanto, para se obter uma resposta real do déficit hídrico, podem ser realizadas medições do potencial hídrico foliar e do solo. Considerando estudos sobre disponibilidade de água no solo para a cultura da cana-de-açúcar (Albuquerque, 2010; Braga, 2010) e de curvas de retenção de água em solos do Cerrado (Silva et al., 2006; Severiano et al., 2009), pode-se afirmar que os solos do Cerrado cultivados com cana-de-açúcar apresentam teor de água crítico (θ_{crit}) quando sua tensão (tensiômetro) encontra-se em torno de 0,07 MPa ($\theta_{\text{crit}} \approx 0,218 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Em relação ao potencial hídrico foliar, os estudos conduzido por Vieira et al. (2014) mostraram que o potencial hídrico da cana-de-açúcar com disponibilidade hídrica pode atingir Ψ_w de -0,1 MPa antemanhã (entre 5 e 6 horas), enquanto que sob déficit hídrico apresentam valores menores que -0,4 MPa.

A perda de água pelas folhas pode, ainda, ser determinada pelo déficit de pressão de vapor entre a folha e a atmosfera (DPV) (Trentin et al., 2011). A assimilação fotossintética de CO₂ eleva-se com o aumento da umidade relativa do ar, ou seja, baixos valores de DPV; e, frequentemente, observa-se que nessa condição a condutância

estomática também se eleva. As condições de baixa umidade do ar podem causar excessivas perdas de água nas folhas, levando ao considerável fechamento estomático, o que afeta significativamente as trocas gasosas entre esses órgãos ($H_2O_{[v]}$) e a atmosfera (CO_2) (Bergonci et al., 2000).

2.5 MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O processo de maturação da cana-de-açúcar é definido pelos fisiologistas como um estágio senescente, entre o crescimento rápido e a morte final da planta e esta ocorre quando as células parenquimáticas de armazenamento (colmos) atingem seu máximo potencial de armazenamento de sacarose (Toppa et al., 2010). A capacidade de armazenamento de sacarose nos colmos da cana-de-açúcar é uma propriedade genética intrínseca de cada variedade, sendo utilizada como parâmetro para definição do seu potencial produtivo (Rodrigues, 1995).

Segundo Cardozo et al. (2013), os termos maturidade, idade (em termos de envelhecimento) e maturação não são sinônimos, mas, do ponto de vista cultural, possuem interrelação, sendo, conseqüentemente, o processo de maturação caracterizado como a culminação do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar. De acordo com os autores, o termo maturidade é corretamente definido como a finalização botânica do colmo, estando este apto a produzir novos perfilhos em cada nó, sendo os fotoassimilados armazenados suficientes apenas para manter o processo de reprodução. Assim, maturidade se difere de idade uma vez que, estando às condições de disponibilidade hídrica e nitrogênio no solo continuamente abundantes, a cana-de-açúcar não atingirá maturidade, independente de sua idade. Ainda, a maturação pode ser alcançada em alguns meses após a brotação pela ocorrência de estresse hídrico, térmico ou nutricional, mesmo não ocorrendo a maturidade da cultura.

Como o processo de maturação da cana-de-açúcar resulta no aumento da concentração de sacarose nos colmos, é possível realizar uma estimativa do estágio ideal de maturação para obtenção de maior rendimento industrial, correlacionando-se a polarização (POL) da cana, que é um indicativo da quantidade, em porcentagem de peso, de sacarose da cana-de-açúcar, a outros parâmetros tecnológicos como °Brix (teor de sólidos solúveis), pureza (Porcentagem de sacarose nos sólidos solúveis totais) e açúcares redutores (glicose e frutose) (Terauchi et al., 2012). Os valores recomendados para esses

indicadores são POL acima de 14 e pureza de pelo menos 85% (Vian, 2011). Para se estimar o índice da maturação por meio do °Brix, recomenda-se que esse valor no ápice do colmo em relação a sua base esteja na faixa de 0,85 a 1,00 (Rossetto, 2011). De acordo com Azevedo (1981), durante a vida da planta, a porcentagem de umidade diminui gradualmente, baixando de 83 para 71% e o teor de sacarose sobe de menos de 10 até mais que 45% do peso do material seco.

2.5.1 Fisiologia e metabolismo da maturação em cana-de-açúcar

O metabolismo que envolve o processo de maturação da cana-de-açúcar é complexo, iniciando pela fotossíntese nos cloroplastos das células foliares e culminando com o acúmulo de carboidratos fotossintetizados, principalmente sacarose, nos colmos (Rodrigues, 1995; Leite et al, 2010). Os eventos envolvidos na síntese de sacarose ou amido dependem de sistemas metabólicos específicos dos cloroplastos e citosol, ligados pelos transportadores de fosfatos presentes nas membranas dos cloroplastos (Toppa et al., 2010).

O carbono assimilado na fotossíntese é sintetizado em amido ou sacarose. Tanto o amido como a sacarose são sintetizados a partir da triose fosfato gerada pelo ciclo de Calvin. O amido é sintetizado no cloroplasto enquanto a sacarose é sintetizada no citosol (Taiz & Zeiger, 2013). As sínteses de sacarose e de amido são reações competitivas que se estabelecem nas folhas da cana-de-açúcar. Quando o citosol possui alta concentração de sacarose, o transportador de fosfato impede a saída da triose fosfato do cloroplasto para o citosol e então esta se compartimenta como amido (Leite et al., 2009).

A sacarose é o principal composto biossintetizado e exportado das folhas da cana-de-açúcar (Rodrigues, 1995). A transferência da sacarose das células do mesofilo para o floema envolve a passagem através da membrana plasmática e da parede celular. O carregamento de sacarose para as células companheiras do floema funciona eficientemente sob condições de baixas concentrações de sacarose na parede celular (Toppa et al., 2010). Quando a concentração de sacarose no apoplasto é elevada, prejudicando o funcionamento dos transportadores de sacarose, a enzima invertase ácida celular é ativada, a qual hidrolisa a sacarose convertendo-a em hexoses. Estas hexoses retornam às células do mesofilo, sendo novamente convertidas à sacarose. A hidrólise da sacarose, entre o apoplasto e o simplasto, é realizada a fim de manter sua concentração em níveis ideais para o satisfatório

funcionamento dos transportadores de sacarose. Quando a sacarose se encontra no interior das células companheiras seu transporte pelo floema é preferencialmente realizado via plasmodesmo, por conferirem menor resistência ao transporte, a favor de um gradiente de concentração. Este processo, até aqui descrito, ocorre nas folhas da cana-de-açúcar, local também denominado fonte, de onde os fotoassimilados são translocados para os órgãos da planta onde serão consumidos ou armazenados, os denominados drenos (Rodrigues, 1995; Taiz & Zeiger, 2013).

Após a sacarose chegar ao floema na fonte, por este sistema vascular, se deslocará até o dreno. Este movimento ocorre por diferentes mecanismos, passivos e ativos. Ressalta-se que o fluxo do floema é gerado por um gradiente de pressão de turgor entre as células da fonte, de maior pressão, e do dreno, menor pressão. Esse gradiente de pressão é devido ao carregamento de sacarose na fonte e descontínuo descarregamento no dreno. Devido às células do floema na fonte serem constantemente carregadas de sacarose, a concentração deste açúcar torna mais negativo o potencial osmótico destas células, provocando a entrada de água e o aumento da turgescência. Assim, o movimento da sacarose pelo floema é por fluxo de massa, até atingir a célula dreno, onde sofre descarregamento para o interior do vacúolo de uma célula do parênquima no colmo (Rodrigues, 1995; Taiz & Zeiger, 2013).

Ao alcançar as células dreno, a sacarose sofre inúmeras transformações antes de ser efetivamente armazenada no vacúolo. A sacarose é transformada em glicose e frutose, ainda no apoplasto do tecido parenquimatoso, pela ação da invertase ácida presente nas paredes celulares. Como hexoses, estas penetrarão, por difusão, o citoplasma das células do parênquima do colmo e, então, passarão por reações mais complexas a fim de que a sacarose penetre o vacúolo. Para isso, a sacarose deve ser ativada (sacarose-P), para que assim, a partir da quebra da ligação de fosfato, a sacarose tenha energia para penetrar no vacúolo, por transporte ativo, para que seja, então, armazenada (Moore, 1995; Rodrigues, 1995; Taiz & Zeiger, 2013).

Durante o processo de maturação da cana-de-açúcar, o armazenamento de sacarose ocorre no sentido da base para o ápice da planta. Assim, observa-se um gradiente de sacarose entre os terços basal, médio e apical da planta, sendo que no decorrer da maturação este gradiente tende a se reduzir, quando a concentração de sacarose do ápice se aproxima à da base. Alguns entrenós não armazenam apreciável quantidade de sacarose, se

caracterizando por ainda serem imaturos com folhas verdes (presentes no ápice) ou superamadurecidos com alto teor de fibra (presentes na base) (Rodrigues, 1995).

O armazenamento de sacarose ocorre de maneira individual nos entrenós, sendo esse acúmulo mais elevado na direção do centro do colmo, reduzindo no sentido das pontas, nos nós (Rodrigues, 1995). O gradiente de concentração de sacarose nos entrenós é mais evidente na região do ápice. Isto provavelmente ocorre devido à distribuição diferente de invertase, onde o meristema intercalar (anel de crescimento) contém maior quantidade de invertase ácida quando comparada aos tecidos centrais do entrenó (Rodrigues, 1995; Taiz & Zeiger, 2013).

O mecanismo de acúmulo de sacarose não se difere entre os tecidos jovens e maduros. Todavia, algumas diferenças entre o acúmulo são sabidas, como a presença de reguladores vegetais e a ação das invertases (Toppa et al., 2010). Nos tecidos imaturos a sacarose armazenada é rapidamente hidrolisada e convertida em hexoses pela invertase ácida vacuolar, movendo-se as hexoses para o citoplasma, onde são utilizadas no crescimento e expansão. O processo de síntese da invertase ácida vacuolar é influenciado por reguladores vegetais (auxinas) e condicionada a um sistema de controle repressivo dependente da concentração de hexoses no citoplasma (Taiz & Zeiger, 2013). Sob condições favoráveis ao crescimento a atividade da invertase ácida é elevada, contudo, em condições ambientais desfavoráveis, como sob déficit hídrico, fotoperíodo curto e temperaturas baixas, esta atividade diminui (Batta et al., 2007; Batta et al., 2011). A fase de maturação da cana-de-açúcar é caracterizada pelo aumento da ação da invertase neutra ou alcalina. A atividade quase nula da invertase ácida vacuolar indica que está ocorrendo acúmulo efetivo de sacarose (Batta et al., 2007).

Assim, o processo de maturação dos colmos da cana-de-açúcar é caracterizado pela redução da atividade da invertase ácida do apoplasto, baixa atividade de invertase ácida do citoplasma e atividade quase nula de invertase ácida vacuolar. Nas paredes das células maduras se encontram invertases alcalinas ou neutras (Batta et al., 2007; Batta et al., 2011). A queda da atividade de invertases ácidas e a ocorrência de invertases alcalinas ou neutras é resultado da alta concentração de sacarose, que supre a ação da invertase ácida e, então, a função passa a ser gradativamente efetuada pela invertase alcalina, indicando maturidade e preparação do tecido para acúmulo de sacarose (Rodrigues, 1995).

2.6 MODELAGEM MATEMÁTICA

Modelos são a caracterização de um sistema real em sua forma teórica, podendo ser, por vezes, compilado por um conjunto de equações a serem utilizadas na simulação de um dado sistema (Marin et al., 2014). Dourado-Neto et al. (1998) afirmam que modelos são protótipos, representações simplificadas de um sistema, construídos para nos auxiliar a entender melhor o funcionamento de um sistema real e as interações de seus principais componentes, sendo excelentes mecanismos de previsão.

Os modelos podem ser classificados em: conceitual, físico ou matemático, sendo os modelos matemáticos utilizados para o desenvolvimento dos modelos de cultura, o que se verifica pela sua descrição por meio de equações (Dourado-Neto et al., 1998). E, especificamente, a modelagem de culturas pode ser definida como uma simulação dinâmica de um processo fisiológico (p.e., crescimento, acúmulo de sacarose) de culturas a partir de formulações numéricas auxiliadas pela utilização de computadores (Sinclair & Seligman, 1996).

A elaboração de um modelo matemático segue as regras básicas do método científico: i) a observação de um sistema; ii) a formulação de uma hipótese na tentativa de explicar as observações; iii) previsão do comportamento do sistema através da simulação, isto é, por meio do modelo; e, iv) a experimentação para testar a validade da hipótese, com consequente validação do modelo (Dourado-Neto et al., 1998).

A complexidade intrínseca tanto do planejamento quanto do manejo de sistemas agrícolas vem, nas últimas décadas, justificando o desenvolvimento de modelos matemáticos utilizados como ferramenta de apoio a diversas decisões, desde a seleção de cultivares até o gerenciamento estratégico de culturas, investimentos em infraestrutura e decisões de marketing (Marin et al., 2014). Ressalta-se que esses sistemas são complexos devido ao elevado número de variáveis e de processos envolvidos no sistema solo-planta-atmosfera (Dourado-Neto et al., 1998).

Os modelos de culturas foram, em sua maioria, desenvolvidos para serem utilizados como ferramenta de apoio à decisão para produtores ou consultores agrícolas (Wery & Lecoueur, 2000). Além disso, esses modelos têm sido empregados principalmente como instrumentos de pesquisa que auxiliam na integração do conhecimento sobre o comportamento das culturas, na análise de experimentos de campo e

na avaliação do impacto da seleção de cultivares (Wery & Lecoueur, 2000; Marin et al., 2014).

Os modelos matemáticos possuem inúmeras classificações, mas os dois principais são os modelos empírico e mecanicista (Dourado-Neto et al., 1998; Marin et al., 2014). Em geral, os modelos empíricos, às vezes chamados de modelos correlativos ou estatísticos, descrevem relações entre variáveis sem se referir aos processos correlacionados, ou seja, descreve o comportamento da planta baseado diretamente em observações no nível da planta. Os modelos mecanicistas, também chamados de modelos explicativos ou dinâmicos, tentam representar relações de causa-efeito entre as variáveis, por exemplo, um modelo mecanicista de crescimento vegetativo descreve o desempenho da planta com base no conhecimento dos processos que estão ocorrendo em seu crescimento e desenvolvimento (Dourado-Neto et al., 1998).

Os modelos empíricos consistem na análise de dados experimentais e posterior idealização de equações matemáticas, para a formulação dos modelos, que se ajustam aos dados observados. Nesse modelo são utilizados dados empíricos, variáveis ou constantes consagradas que fazem parte do conhecimento de determinado ramo da ciência (Teramoto, 2003). Uma desvantagem desses modelos é que eles não podem ser extrapolados, apenas interpolados, devendo ser utilizados em condições semelhantes àquelas em que foram gerados (Dourado-Neto et al., 1998).

Os modelos mecanicistas, contrariamente aos empíricos, descrevem um sistema em termos dos mecanismos físicos, químicos e biológicos. Assim, os modelos mecanicistas são embasados na composição do sistema, subdividindo-se em componentes e predizendo o comportamento desse sistema de maneira integral a partir do comportamento dos componentes individuais e suas interações (Teramoto, 2003).

Ressalta-se que, em determinado nível de organização, todos os modelos são empíricos. Como exemplo, Dourado-Neto et al. (1998) cita o software GLYCIM, um modelo mecanicista de previsão do crescimento e rendimento da soja. Este software é constituído por milhares de equações que descrevem os ambientes atmosféricos e do solo, interceptação de luz pelas folhas, fotossíntese, divisão de carbono entre diferentes órgãos, respiração e absorção de água e nutrientes. No nível da organização da fotossíntese, por exemplo, o modelo deixa de ser mecanicista e torna-se empírico, porque a equação que representa a fotossíntese para a área foliar não representa uma correlação entre as variáveis.

2.6.1 Modelagem matemática em cana-de-açúcar

A maioria dos modelos de culturas disponíveis foi desenvolvida durante as décadas de 70 e 80 (Marin et al., 2014) e os modelos matemáticos específicos da cana-de-açúcar seguiram a mesma tendência, tanto na pesquisa nacional quanto internacional.

Em relação aos estudos desenvolvidos por pesquisadores brasileiros sobre o assunto, o primeiro trabalho publicado foi de Ometto (1974) no qual propôs um modelo para a determinação do rendimento agrícola da cana-de-açúcar em função de parâmetros climatológicos (evapotranspiração potencial e real) e nutricionais (disponibilidade de fósforo). Machado (1981) desenvolveu em seu trabalho um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca da cana-de-açúcar em resposta à variação das condições ambientais, sendo o modelo constituído por uma série de equações que descrevem quantitativamente um comportamento fisiológico da planta, como, por exemplo, taxas de fotossíntese total e respiração total. As estimativas obtidas por meio deste modelo apresentaram-se consistentes, ainda que o modelo tenha subestimado os resultados nas fases inicial e final do desenvolvimento e superestimado na fase intermediária. Pereira & Machado (1986) propuseram um simulador matemático-fisiológico de crescimento diário, respiração e fotossíntese da cana-de-açúcar, denominado SIMCANA, em função das condições diárias de radiação solar global, temperaturas máxima e mínima e umidade relativa do ar, apresentando resultados razoáveis. Barbieri (1993) desenvolveu um modelo matemático de estimativa do crescimento e rendimento agrícola potencial da cana-de-açúcar utilizando equações que descrevem o comportamento fisiológico da planta em resposta às condições ambientais. A validação deste modelo, realizada a partir de valores experimentais de produção de diferentes variedades de cana-de-açúcar, apresentou significância aos níveis de 1 e 5% de probabilidade.

Mais recentemente, demais pesquisadores brasileiros trabalharam com modelagem da cana-de-açúcar considerando diferentes condições climáticas do Brasil, seja a partir de calibração de modelos já existentes (Teramoto, 2003; Suguitani, 2006) ou pelo desenvolvimento de novos modelos matemáticos específicos para variedades brasileiras de cana-de-açúcar (Scarpari, 2007; Cardozo, 2012).

Outro método de estimativa da produtividade agrícola, amplamente utilizado com a cana-de-açúcar, é o Método da Zona Agroecológica – ou modelo FAO (Doorenbos

& Kassam, 2000), o qual estima, de forma geral, a produtividade potencial dos cultivos agrícolas supondo que as necessidades hídricas e nutricionais são atendidas de forma satisfatória, bem como, não contabiliza uma quebra devido ao ataque de doenças e, ou, pragas. Embora seja um modelo genérico, apresenta resultados satisfatórios quando aplicado em sistemas de previsão de safra para cana-de-açúcar (Teramoto, 2003; Oliveira et al., 2012; Caetano & Casaroli, 2017).

Embora a contribuição nacional nesse assunto tenha sido importante, as escolas de modelagem de outros países tornaram-se mais famosas devido ao fato de organizarem seus modelos em programas computacionais. Dessa forma, além de facilitarem sua utilização, os divulgaram em âmbito mundial. Dentre os principais modelos referidos, destacam-se o APSIM–Sugarcane, CANEGRO, CANESIM e o QCANE.

Na África do Sul, Thompson (1976) desenvolveu o modelo CANEGRO, que foi incluído no programa DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). O modelo CANEGRO simula o crescimento da cana-de-açúcar usando informações dos elementos meteorológicos e do balanço hídrico.

O modelo CANESIM (Singels & Donaldson, 1998), também desenvolvido na África do Sul, deriva do IRRICANE (modelo proposto para manejo de irrigação da cana-de-açúcar) acrescido de modelos de simulação de produtividade e também de um modelo de crescimento de área foliar. O modelo CANESIM foi desenvolvido com os mesmos conceitos básicos do modelo CANEGRO, entretanto, o CANEGRO é um modelo mais complexo que demanda maior quantidade de parâmetros em suas rotinas (Teramoto, 2003).

O modelo APSIM–Sugarcane (Agricultural Production Systems sIMulator) foi desenvolvido na Austrália por Bull & Tovey (1974) a partir de modelagem de cana-de-açúcar e atualmente permite a simulação de sistemas contemplando diversas variedades de vegetais, solos, climas e suas interações. Esse modelo opera em escala diária e simula a produção de cana-de-açúcar, sacarose, fitomassa, uso da água, além da captação de nitrogênio e partição de fotoassimilados, diferenciando cana-planta de soca e teor de água no colmo (Lisson et al., 2005).

Outro modelo australiano, o QCANE (Liu & Bull, 2001) foi desenvolvido para simular o crescimento e o acúmulo de açúcar nos colmos. Seu dinamismo baseia-se nos processos de desenvolvimento, com ênfase na fotossíntese, respiração e partição dos fotoassimilados, sendo que este, por sua vez, se divide em fitomassa estrutural ou sacarose (Cardozo, 2012).

Ao se elaborar modelos matemáticos de culturas, uma preocupação inerente dos pesquisadores é na melhoria tanto da qualidade de previsão dos dados simulados quanto da calibração do modelo. Especificamente, sobre a modelagem da cana-de-açúcar, embora existam muitos modelos na literatura que possam estimar sua produção de fitomassa, ainda é difícil modelar o conteúdo de sacarose (Scarpari & Beauclair, 2009), visto que a cultura é submetida a diferentes condições ambientais e de manejo durante o seu desenvolvimento e o rendimento é variável de acordo com estas condições (Scarpari & Beauclair, 2004).

A estimativa da partição dos fotoassimilados em sacarose ainda apresenta grande dificuldade devido ao insuficiente conhecimento que se tem dos processos que envolvem a interação das condições climáticas e as respostas fisiológicas da cana-de-açúcar (Scarpari & Beauclair, 2009). Ressalta-se a importância da determinação do acúmulo de sacarose, em termos do grau de maturação da cultura, para o planejamento estratégico da colheita e a otimização do retorno econômico da cultura (Cardozo, 2012).

Scarpari & Beauclair (2004) desenvolveram um modelo capaz de obter estimativas de açúcar total recuperável (ATR), utilizando dados referentes aos fatores de produção como armazenamento de água no solo e graus-dias negativos. Para isso, foi utilizado um modelo agroclimático que relaciona o ATR (variável dependente) com o armazenamento de água no solo e graus-dias negativos (variáveis independentes). O modelo de maturação para cana de ano não apresentou diferença significativa ($\alpha=0,05$) entre os dados obtidos a campo e os estimados, sendo significativo para o município de Puntal – SP.

Semelhante ao trabalho de Scarpari & Beauclair (2004), Scarpari & Beauclair (2009) elaboraram modelos empíricos de maturação, em termos de açúcar total recuperável (ATR), para diferentes variedades de cana-de-açúcar para as condições climáticas do município de Piracicaba – SP. Todos os modelos avaliaram o ATR de forma aceitável para as condições estudadas.

Cardozo et al. (2015) também propuseram modelos empíricos para estimar o conteúdo de açúcar total recuperável (ATR) sob condições climáticas distintas no estado de São Paulo e a avaliação desses modelos indicou resultados satisfatórios.

Em todos esses trabalhos supracitados, que propuseram modelos matemáticos específicos para a determinação de ATR da cana-de-açúcar, os autores foram unânimes na afirmativa de que tais pesquisas carecem de maiores investigações a fim de otimizar a

aplicação dos modelos já desenvolvidos por meio de calibrações e de elaborar novos modelos matemáticos a partir informações de diferentes condições ambientais e, ou, variedades. Ainda, espera-se que estes modelos demandem, na sua aplicação, variáveis de fácil obtenção e apresentem estimativas robustas.

2.7 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P.E.P. **Estratégias de manejo de irrigação: Exemplos de cálculo.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. Circular técnica 136. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/publica/2010/circular/Circ_136.pdf> Acesso em: 04 jan. 2017.

ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORA, I.; BARBOSA, G.V.S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R.A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência Agrotecnológica**, Lavras, v.32, n.5, p.1441-1448, 2008.

ANDRADE, A.M.D.; MOURA, M.A.L.; SANTOS, A.B.; CARNEIRO, R.G.; SILVA JUNIOR, R.S. Radiação fotossinteticamente ativa incidente e refletida acima e abaixo do dossel de floresta de Mata Atlântica em Coruripe, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.29, n.1, p.68-79, 2014.

ANDRÉ, R.G.B.; MENDONÇA, J.C.; MARQUE, V.S.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.25, n.3, p.375-382, 2010.

ARALDI, R.; SILVA, F.M.L.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.3, p.694-702, 2010.

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.

AZEVEDO, H.J. **Fisiologia da cana-de-açúcar.** Araras: Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar, 1981. 108p.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: **Planalsucar**, Coordenadoria Regional Sul. COSUL. Araras. 1977. p.1-22.

BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico na cana-de-açúcar (*Saccharum spp*).** 1981. 82f. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentos) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa.** 1993. 142

p. Tese (Doutorado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

BARNABAS, L.; RAMADASS, A.; AMALRAJ, R.S.; PALANIYANDI, M.; RASAPPA, V. Sugarcane proteomics: an update on current status, challenges, and future projects. **Proteomics**, Weinheim, v.15, p.1658–1670, 2015.

BATTA, S.K.; UBHI, M.K.; SANDHU, S.K.; UPPAL, S. Enzymatic regulation of sucrose synthesis, transport and accumulation in sugarcane cultivars differing in maturity. **Sugar Tech**, Lucknow, v.9, n.4, p.263-270, 2007.

BATTA, S.K.; KAUR, B.; SITAL, J.S.; SANDHU, S.K.; UPPAL, S.K. Sucrose accumulation and intermodal soluble invertase isoenzymes in plant and ratoon crops of sugarcane. **Sugar Tech**, Lucknow, v.13, n.1, p.51-59, 2011.

BATISTA, E.L.S. ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; LYRA, G.B.; SILVA, T.G.F.; BOEHRINGER, D. Modelagem do crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no período de formação da cultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 10, p. 1080–1087, 2013.

BELTRÃO, N.E.M.; FIDELES FILHO, J.; FIGUEIRÊDO, I.C.M. Uso adequado de casa-de-vegetação e de telados na experimentação agrícola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p.547-552, 2002.

BELTRÃO, N.E.M.; OLIVEIRA, M.I.P. **Diferenciação na produção de energia entre oleaginosas (metabolismo C3) e energéticas (C4)**. Campina Grande, 2008. 30p. (Embrapa Algodão. Documentos, 198).

BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.8, p.1531-1540, 2000.

BRAGA, M.B. **Uso da tensiometria no manejo da irrigação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. 28 p. Documentos, 235. Disponível em: <
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/884330/1/Documentos235.pdf>>
Acesso em: 04 jan. 2017.

BULL, T.A.; TOVEY, D.A. Aspects of modeling sugarcane growth by computer simulation. In: International Society Sugarcane Technologists, 15., 1974. Durban. **Proceedings...** Durban: ISSCT, 1974. p. 1021-1032.

CAETANO, J.M.; CASAROLI, D. Sugarcane yield estimation for climatic conditions in the center of state of Goiás. **Ceres**, Viçosa, v.64, n.3, p.298-306, 2017.

CAMPBELL, R.B.; CHANG, J.H.; COX, D.C. Evapotranspiration of sugarcane in Hawaii as measure by in-field lysimeters in relation to climate. **International Society of Sugar Technology**, Hawaii, v.9, p.637-649, 1960.

CARDOZO, N.P. **Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas**. 2012. 201p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.70, n.6, p.449-456, 2013.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C.; PANOSSO, A.R.; PALHARES, A.L.; IDE, B.Y. Modeling sugarcane ripening as a function of accumulated rainfall in Southern Brazil. **International Journal of Biometeorology**, Lisse, v.59, n.12, p.1913–1925, 2015.

CARLIN, S.D.; SANTOS, D.M.M. Indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.9, p.1106-1113, 2009.

CARVALHO, C.M.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J.; FARIAS, C.H.A.; SILVA, C.T.S.; GOMES FILHO, R.R. Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.4, n.1, p.72-77, 2009.

CHARLO, H.C.O.; OLIVEIRA, S.F.; CASTOLDI, R.; VARGAS, P.F.; BRAZ, L.T.; BARBOSA, J.C. Growth analysis of sweet pepper cultivated in coconut fiber in a greenhouse. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 3, p. 316-323, 2011.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; ABREU, H.M.C.; ARRUDA, P.; BESPALHOK FILHO, J.C.; BURNQUIST, W.L.; CRESTE, S.; CIERO, L.; FERRO, J.A.; FIGUEIRA, A.V.O.; FILGUEIRAS, T.S.; GROSSI-DE-SÁ, M.F.; GUZZO, E.C.; HOFFMANN, H.P.; LANDELL, M.G.A.; MACEDO, N.; MATSUOKA, S.; REINACH, F.C.; ROMANO, E.; SILVA, W.J.; SILVA FILHO, M.C.; ULIAN, E.C. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): a reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, Kunia, v.4, p.62–89, 2011.

CINTRA, J.E.V.; FERREIRA, G.H.; BRASIL, R.P.C. Viabilidade da irrigação suplementar na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) em regiões com déficit hídrico. **Nucleus**, Ituverava, Edição Especial, 2008.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v.2 - Safra 2015/16, n.4 - Quarto levantamento, Brasília: Conab, 2016. p.1-76. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_14_09_06_31_boletim_cana_portugues_4o_lev_15-16.pdf. Acesso em 10 out. 2016.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v.3 - Safra 2016/17, n.4 - Quarto levantamento, Brasília: Conab, 2017a. p.1-77. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_19_11_27_36_boletim_cana_portugues_4o_lev_16-17.pdf. Acesso em 10 nov. 2017.

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

DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2010. 882p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de GHEYI, H.R.; SOUSA, A.A.; DAMASCENO, F.A.V.; MEDEIROS, J.F. Campina Grande: UFPB, 2000. 221p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33, 2.ed.).

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 Agricola**, Piracicaba, v.55, (Número Especial), p.46-50, 1998.

DU, Y.C.; NOSE, A.; WASANO, K.; UCHIDA, Y. Responses to water stress of enzyme activities and metabolite levels in relation to sucrose and starch synthesis, the Calvin cycle and the C4 pathway in sugarcane (*Saccharum* sp.) leaves. **Australian Journal Plant Physiology**, Bethesda, v.25, p.253-60, 1998.

DU, Y.C.; NOSE, A.; WASANO, K. Effects of chilling temperature on photosynthetic rates, photosynthetic enzyme activities and metabolite levels in leaves of three sugarcane species. **Plant, Cell and Environment**, Logan, v.22, n.3, p.317-324, 1999.

ECCO, M.; SANTIAGO, E.F.; LIMA, P.R. Respostas biométricas em plantas jovens de cana-de-açúcar submetidas ao estresse hídrico e ao alumínio. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v.5, n.1, p.59-67, 2014.

ENDRES, L.; SILVA, J.V.; FERREIRA, V.M.; BARBOSA, G.V.S. Photosynthesis and water relations in Brazilian sugarcane. **The Open Agriculture Journal**, Bussum, v.4, p.31-37, 2010.

FAN, L.; LINKER, R.; GEPSTEIN, S.; TANIMOTO, E.; YAMAMOTO, R.; NEUMANN, P.M. Progressive inhibition by water deficit of cell wall extensibility and growth along the elongation zone of maize roots is related to increase lignin metabolism and progressive stellar accumulation of wall phenolics. **Plant Physiology**, Bethesda, v.140, p.603-612, 2006.

FAO. Food and Agriculture Organization (FAO). **FAOSTAT**. 2016. Disponível em: <<http://faostat.org/>>. Acesso em 15 out. 2016.

FURTADO, C. **Formação econômica do Brasil**, 34ed. Rio de Janeiro: Companhia Editora Nacional, 2007. 352p.

FURTADO, A.T.; SCANDIFFIO, M.I.G.; CORTEZ, L.A.B. The Brazilian sugarcane innovation system. **Energy Policy**, Surrey, v.39, p.156-166, 2011.

GIMENEZ, D.F.J.; DEDEMO, G.C.; VANTINI, J.S.; SILVA, A.C.B.; TEZZA, R.I.D.; DABBAS, K.M.; MUTTON, M.A.; FERRO, M.I.T. Análise dos parâmetros biométricos, acúmulo de prolina e identificação de genes envolvidos na resposta ao déficit hídrico em cana-de-açúcar, por cDNA-AFLP. **Científica**, Jaboticabal, v.41, n.2, p.209–225, 2013.

GLOVER, J. Changes in sucrose % cane and yield of sucrose per unit area associated with cold, drought and ripening. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association**. p.158-164, 1971.

GONÇALVES, E.R.; FERREIRA, V.M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T.P.; DUARTE, W.G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.4, p.378–386, 2010.

INMAN-BAMBER, N.G.A. Temperatura and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.36, p.41-51, 1994.

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.

JADOSKI, C.J.; TOPPA, E.V.B.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, Guarapuava, v.3, n.2, p.169-176, 2010.

LEITE, G.H.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M.A.; VENTURINI FILHO, W.G.; SURIANO, A. Qualidade tecnológica, produtividade e margem de contribuição agrícola da cana-de-açúcar em função da aplicação de reguladores vegetais no início da safra. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.3, 2009.

LEITE, G.H.P.; CARLOS CRUSCIOL, A.C.; SIQUEIRA, G.F.; SILVA, M.A. Qualidade tecnológica em diferentes porções do colmo e produtividade da cana-de-açúcar sob efeito de maturadores. **Bragantia**, Campinas, v.69, n.4, p.861-870, 2010.

LISSEON, 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, 2001.

MACHADO, E.C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de material seca na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1981. 115 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1981.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MACHADO, D.F.S.P.; LAGÔA, A.M.M.A.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, R.S.; MACHADO, E.C. Baixa temperatura noturna e deficiência hídrica na fotossíntese de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.5, p.487-495, 2013.

MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em 10 out. 2016.

MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JÚNIOR, J. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. 530p. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/home/publicacoes/agrometeorologia_dos_cultivos.pdf>. Acesso em 21 ago. 2016.

MARIN, F.; NASSIF, D.S.P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.2, p.232-239, 2013.

MARIN, F.R.; JONES, J.W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.71, n.1, p.1-16, 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**, Rio Claro, v.26, p.49-63, 2014.

MONTEIRO, L.A. **Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo**. 116p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2012.

MOORE, P.H. Temporal and spatial regulation of sucrose accumulation in the sugarcane stem. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v.22, p.661-679, 1995.

OLIVEIRA, R.A.; SANTOS, R.S.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; BARBOSA, M.H.P. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.5, p.549-557, 2012.

OMETTO, J.C. **Equação para a estimativa de evapotranspiração potencial, sua aplicação no cálculo das necessidades hídricas e do rendimento agro-industrial da**

cana-de-açúcar na região de Piracicaba – SP. 1974. 129 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1974.

OMETTO, J.C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440p.
PASSIOURA, J. The drought environment: physical, biological and agricultural perspectives. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.58, p.113-117, 2007.

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

PILAU, F.G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; SCHWERZ, L. Temperatura basal, duração do ciclo e constante térmica para a cultura do crambe. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.4, p.958-964, 2011.

ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.J.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.64, p.221-227, 1999.

ROACH, B.T.; DANIELS, J. (1987) **A review of the origin and improvement of sugarcane.** In: Copersucar International Sugarcane breeding Workshop. Ed. Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo 1: 1–31.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da Cana-de-açúcar.** Botucatu: Unesp, 1995, 75p.

RODRIGUES, J.A.R. Do engenho à biorrefinaria: a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. **Química Nova**, São Paulo, v.34, n.7, p.1242-1254, 2011.

ROSSETTO, R. Maturação. In: MARIN, F.R. (ed.) **Cana-de-açúcar.** Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília – EMBRAPA. 2011. Disponível: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_90_22122006154841.html#. Acesso em: 07 jan. 2017.

SCARPARI, M.S. **PREDPOL:** um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado. Tese (doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Sugarcane maturity estimation through edaphicclimatic parameters. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, p. 486-491, 2004.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, n.5, p.622-628, 2009.

SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: CP 2, 2006. 415f.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; CURI, N.; DIAS JÚNIOR, M.S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.33, p.159-168, 2009.

SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.G. Crop modeling: from infancy to maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.5, p.698-704, 1996.

SILVA, E.C.; NOGUEIRA, R.J.M.C.; AZEVEDO NETO, A.D.; SANTOS, V.F. Comportamento estomático e potencial da água da folha em três espécies lenhosas cultivadas sob estresse hídrico. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v.17, n.2, p.231-246, 2003.

SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; AZEVEDO, J.A.; RODRIGUES, L.N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.2, p.323-330, 2006.

SILVA, M.A.; SOARES, R.A.B.; LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.3, p.655-661, 2008.

SILVA, E.N.; SILVEIRA, J.A.G.; RODRIGUES, C.R.F.; LIMA, C.S.; VIÉGAS, R.A. Contribuição de solutos orgânicos e inorgânicos no ajustamento osmótico de pinhão-mansô submetido à salinidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.5, p.437-445, 2009.

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; VIEIRA, V.J.S.; F. JÚNIOR, W.G. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.1, p.64-71, 2012.

SILVA, M.A.; SANTOS, C.M.; ARANTES, M.T.; BRUNELLI, M.C.; HOLANDA, L.A. Respostas fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica e a reidratação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.26, n.3, p.28-35, 2013.

SINGELS, A.K.; DONALDSON, R.A. A simple model for unstressed canopy development. **Proceeding of the South African Sugar Technology Association**, v.74, p.151-154, 1998.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mósicas**. 2006. 60p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução: SANTARÉM, E.R. [et al.] 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.

TEJERA, N.A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, Amsterdam v. 102, p. 64-72, 2007.

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 Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

TERAUCHI, T.; IREI, S.; TERAJIMA, Y.; SAKAIGAICHI, T.; MATSUOKA, M.; SUGIMOTO, A. Sugarcane breeding of early maturing clone with high sucrose content for earlier harvest in Japan. **Japan Agricultural Research Quarterly**, Tokyo, v.46, n.3, p.227-235, 2012.

TESTI, L.; GOLDHAMER, D.A.; INIESTA, F.; SALINAS, M. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. **Irrigation Science**, New York, v.26, n.5, p.395-405, 2008.

THOMPSON, G.D. Water use by sugarcane. **South African Sugar Journal**, Durban, v.60, p.593-600, 1976.

TOPPA, E.V.B.; JADOSKI, C.J.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Physiology aspects of sugarcane production. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, Guarapuava, v.3, n.3, 2010.

TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A. J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.6, p.1085-1095, 2011.

VIAN, C.E.F. Qualidade de matéria-prima. In: MARIN, F.R. (ed.) **Cana-de-açúcar**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília – EMBRAPA. 2011. Disponível: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_138_22122006154842.html. Acesso em: 06 jan. 2017.

VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; DELAZARI, F.T. Indicadores morfo-fisiológicos do estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.30, p.65-75, 2014.

WENT, F.W. The Effect of temperature on plant growth. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v.4, p.347-362, 1953.

WERY, J.; LECOEUR, J. Learning crop physiology from the development of a crop simulation model. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, Madison, v.29, 2000.

3 CARACTERIZAÇÃO DO CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NAS CONDIÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS E DE DÉFICIT HÍDRICO TÍPICOS DO CENTRO-OESTE GOIANO

RESUMO

As condições meteorológicas e a disponibilidade hídrica do solo são alguns dos principais fatores abióticos que influenciam o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, visto que as exigências climáticas da cultura variam conforme a sua fase fenológica. Quantificar a influência de variáveis meteorológicas e do solo sobre o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar auxilia na otimização do manejo da cultura e no eficiente uso dos recursos ambientais disponíveis. Assim, esse trabalho objetivou identificar a lâmina de água no solo que reduz as taxas de crescimento da parte aérea e do acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar e, também, descrever por meio de modelos matemáticos o comportamento da planta exposta às condições naturais de ambiente do centro-oeste goiano. O estudo foi conduzido em campo (usina CentroÁlcool[®]), no município de Santo Antônio de Goiás, GO, em cultivo de cana-planta (2013/14), cana-1^a soca (2014/15) e cana-2^a soca (2015/16), da variedade CTC-4. Foram determinados os graus-dia acumulados e as lâminas de água no solo, sendo estas obtidas pelo cálculo do balanço hídrico sequencial semanal, a partir de dados obtidos em estação meteorológica automática (Embrapa - Arroz e Feijão). Avaliaram-se altura de plantas, índice de área foliar (IAF), fitomassa seca da parte aérea (FMS), número de nós e teor de sólidos solúveis (°Brix), quinzenalmente. Quando a lâmina de água no solo se apresentou abaixo da lâmina crítica (191,61 mm) foi observada redução das taxas de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar. No decorrer do tempo e em função dos graus-dia acumulados (GDA), evapotranspiração de referência acumulada (ET_0A) e do déficit hídrico acumulado (DEFA), a altura e o número de nós dos colmos apresentaram comportamento sigmoide e para o índice de área foliar e o teor de sólidos solúveis o comportamento foi quadrático. Os melhores índices de confiança ($c > 0,85$) foram obtidos nas estimativas da altura, número de nós e teor de sólidos solúveis em função da ET_0A e DEFA, assim, estas equações podem ser empregadas para estimar os parâmetros de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar para as condições de ambiente do centro-oeste goiano.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., variáveis biométricas, análise de crescimento, condições climáticas do Cerrado.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF GROWTH AND DEVELOPMENT OF SUGARCANE IN THE TYPICAL AGROMETEOROLOGICAL AND WATER DEFICIT CONDITIONS OF THE MIDWEST GOIANO

The meteorological conditions and water availability of the soil are some of the main abiotic factors that influence the growth and development of sugarcane since the climatic requirements of the crop vary according to its phenological phase. Quantifying the influence of the meteorological and soil variables on the growth and development of sugarcane helps optimize crop management and the efficient use of available environmental resources. That being said, the main focus of the research was to identify the water depth in the soil, which reduces the shoot growth rate and soluble solids accumulation in sugarcane, and also to describe the behavior by mathematical models of the plant when exposed to natural conditions in the midwest of Goiás environment. The research was conducted in the field (usina CentroÁlcool[®]) in the city of Santo Antônio de Goiás, GO, in cane cultivation (2013/14), cane -1st ratoon (2014/15) and cane - 2nd ratoon (2015/16), in variety CTC-4. The cumulative degree days and the water slides in the soil were determined by calculating the weekly sequential water balance from data obtained in an automatic meteorological station (embrapa rice and beans). Plant height was evaluated, Leaf Area Index (IAF), dry shoot biomass (FMS), quantity of nodes and soluble solids content every fortnightly (°BRIX). When the soil water slide showed below the critical blade (191.61 mm), a reduction of the rates in growth and development in the sugarcane was observed. In the course of time and due to the accumulated day degrees (GDA), accumulated reference evapotranspiration (ET_0A) and the accumulated water deficit (DEFA), the height and numbers of stems nodes showed sigmoidal behavior and as for the leaf area index and the soluble solids content, the behavior was quadratic. The best confidence indexes ($c > 0.85$) were obtained in height estimates, quantity of nodes and soluble solids content due to the ET_0A and DEFA, thus, these equations can be used to estimate the growth parameters and development of sugarcane in the environmental conditions of the midwest goiano.

Key words: *Saccharum* spp., biometric variables, growth analysis, Brazilian Cerrado climate conditions.

3.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar tem sua importância na balança comercial brasileira, visto que o Brasil é o maior produtor mundial da cultura. Ainda, o país se destaca pela produção e exportação de etanol, sendo responsável por mais de 50% do volume total global comercializado (MAPA, 2016). Além da importância econômica na produção e exportação, o etanol também tem destaque no território brasileiro dentro da matriz

energética nacional, uma vez que representa a segunda principal fonte de energia no país, sendo a principal fonte de energia renovável (Rodrigues, 2011).

No Brasil, safra 2016/17, mais de 90% da área colhida de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroenergética pertencem à região Centro-Sul, destacando o estado de São Paulo como o maior produtor (56%), seguido por Goiás (10,3%). O estado de Goiás está se estabelecendo como potência nacional na produção de etanol e açúcar. Além de possuir a segunda maior área plantada e produção no país, é o quarto maior produtor de açúcar e segundo maior produtor de etanol (CONAB, 2017).

A atual demanda por produtos derivados da cana-de-açúcar (etanol e açúcar) tem impulsionado estudos que relacionam o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar em função dos diferentes ambientes de cultivo (clima e solo), visando o manejo para cada fase fenológica e o eficiente uso dos recursos ambientais disponíveis.

No decorrer do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, pode-se definir três fases distintas, sendo que a primeira compreende a estabelecimento e o período vegetativo da cultura, a segunda fase abrange a formação da produção e a terceira é a maturação (Doorenbos & Kassan, 2000). A duração de cada fase depende do ciclo da cultura (cana de ano ou cana de ano e meio) e das condições climáticas do ambiente (Dinardo-Miranda et al., 2010; Jadoski et al., 2010).

Em todo o ciclo das espécies vegetais os fatores ambientais são responsáveis pela sua produtividade qualitativa e quantitativa, visto que cada fase fenológica é determinante quanto às exigências climáticas da planta (Cintra et al., 2008). Para a cana-de-açúcar, as condições meteorológicas do ambiente podem influenciar tanto o ritmo de crescimento quanto a intensificação do acúmulo de sacarose, isto em condições específicas de combinação da temperatura do ar e da umidade do solo (Cintra et al., 2008; Dinardo-Miranda et al., 2010).

A temperatura interfere na velocidade das reações bioquímicas e na ação de enzimas envolvidas na divisão, diferenciação e crescimento celular. Na cultura da cana-de-açúcar, sob condição de temperaturas baixas, isto é, abaixo da temperatura basal inferior que varia entre 18 a 20 °C (Cardozo & Sentelhas, 2013; Marin & Jones, 2014), ocorre redução na síntese de sacarose nas células do parênquima no colmo, o que limita a fotossíntese devido à redução de demanda por trioses fosfato. Isto ocorre, pois, quando trioses fosfato são exportadas do cloroplasto para o citosol nas células foliares, uma quantidade equimolar de fosfato inorgânico é captada por meio de transportador de fosfato

na membrana do cloroplasto. Quando o citosol possui alta concentração de sacarose o transportador de fosfato impede a saída da triose fosfato do cloroplasto para o citosol, assim a taxa de absorção de fosfato no cloroplasto é inibida e a fotossíntese torna-se limitada pelo fosfato (Taiz & Zeiger, 2013).

Para a cana-de-açúcar a faixa de temperatura ótima para o máximo crescimento e desenvolvimento vegetativo está entre 30 e 34 °C. Em ambientes que a temperatura do ar se encontra abaixo de 25 °C ou acima de 35 °C o crescimento da planta se torna lento, sendo praticamente nulo em temperatura superior a 38 °C, e inferior a 20 °C. Valores constantes e acima de 38-40 °C podem afetar o seu desenvolvimento pelo efeito inibitório de atividades fisiológicas, como abertura de estômatos e troca de CO₂ (Barbieri & Villa Nova, 1977; Doorembos & Kassan, 1994). O processo de maturação fisiológica depende da redução sazonal da temperatura, a qual retarda a taxa de desenvolvimento vegetativo sem, porém, afetar significativamente o processo fotossintético, de maneira que haja maior saldo de produtos fotossintetizados transformados em açúcares para armazenamento nos tecidos da planta (Inman-Bamber & Smith, 2005; Cardozo & Sentelhas, 2013). No caso da maturação, considera-se que temperaturas abaixo de 20 °C reduz a taxa de crescimento da cana-de-açúcar e proporcionam acúmulo de sacarose em seus colmos (Barbieri & Villa Nova, 1977).

A umidade do solo também é determinante em todas as fases fenológicas da cana-de-açúcar. Isto, porque, a água tem papel fundamental nos processos bioquímicos que ativam a brotação e que influenciam no número de perfilhos, no acúmulo de fitomassa total da planta (Marin et al., 2009) e no rendimento de sacarose, fundamental para obtenção de elevadas produtividades (Machado et al., 2009). O déficit hídrico no solo pode prejudicar ou impedir esses processos e isso depende da intensidade e da duração do período de déficit hídrico (André et al., 2010). A base fisiológica que justifica a correlação entre lâmina de água no solo e produtividade da cultura é o fato de que a transpiração vegetal e a fotossíntese utilizam-se dos estômatos, sendo que a redução na transpiração é acompanhada por redução na fotossíntese da planta (Taiz & Zeiger, 2013), visto que, devido ao déficit hídrico, pode ocorrer uma redução de 89% na fotossíntese líquida em resposta a uma redução de 78% da transpiração vegetal (Gonçalves et al., 2010).

Devido ao déficit hídrico influenciar a taxa fotossintética, ocasionando redução na síntese de carboidratos, com conseqüente redução, de até 83%, do crescimento da parte

aérea (Ecco et al., 2014), ocorre incremento de ao menos 10% no conteúdo de sacarose (Machado et al., 2009).

Em regiões tropicais, como o centro-oeste goiano, a temperatura mínima do ar não representa um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, porém o déficit hídrico acentuado ao longo do ciclo da cana-de-açúcar é suficiente para causar prejuízos na produção final (fitomassa da parte aérea e sacarose).

Assim, esse estudo teve por objetivo identificar a lâmina de água no solo, via monitoramento agrometeorológico, que ocasiona redução ou paralização no crescimento da parte aérea e no acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar exposta às condições naturais de ambiente do centro-oeste goiano. Ainda, objetivou-se descrever e quantificar, por meio de modelos matemáticos, o comportamento do crescimento e desenvolvimento da planta em função de variáveis agroclimáticas e da lâmina de água do solo.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Santo Antônio de Goiás-GO (16°29'08" S; 49°20'36" W; 780 m), em área experimental de aproximadamente 280 ha, arrendada pela destilaria CentroAlcool[®]. Segundo a classificação climática de Köppen, a região possui clima do tipo Aw (tropical de savana), megatérmico, caracterizado por inverno seco (maio-outubro) e verão chuvoso (setembro-abril).

A variedade de cana-de-açúcar cultivada na área foi a CTC 4, caracterizada como de maturação média a tardia e tolerante à seca. Apresenta desenvolvimento vigoroso, hábito final sem tombamento, colmos médios a longos, diâmetro fino a médio, com fácil despalha e bom perfilhamento (CTC, 2013).

Os dados coletados são referentes aos anos-safra 2013/2014 (cana-planta), 2014/2015 (cana - 1ª soca) e 2015/2016 (cana - 2ª soca). O sistema de plantio adotado foi o semi-mecanizado com sulcagem da área, realizado em abril de 2013. Foram utilizadas mudas pré-brotadas, com espaçamento de 1,5 m entre fileiras. A colheita foi feita manualmente, sendo que o primeiro corte ocorreu em setembro de 2014 e o segundo e terceiro cortes ocorreram em outubro de 2015 e 2016, respectivamente.

O experimento foi realizado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura franco-argilo-arenoso (270 g kg⁻¹ de argila, 130 g kg⁻¹ de silte e 600 g kg⁻¹ de areia) (EMBRAPA, 2013). O solo foi preparado com aração e gradagem. Considerando a análise

química do solo (Tabela 3.1) o manejo corretivo do solo foi realizado. Aplicaram-se 2,0 t ha⁻¹ de gesso agrícola e 4,0 t ha⁻¹ de calcário para a correção do solo. No plantio foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, e em cobertura 380 kg ha⁻¹ do formulado 18-00-27 (N-P-K). As plantas daninhas foram controladas pela aplicação de herbicidas para o controle de plantas daninhas de folhas largas, nas quantidades recomendadas pelo fabricante.

Tabela 3.1. Análise química do solo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, Santo Antônio de Goiás, Goiás.

Talhão	Data	pH	g/dm ₃		mmol C/dm ³				%		
			M.O.	P Resina	K	H+Al	Ca	Mg	CT C	SB	V
1	18/06/2012	6,3	34	7	0,4	19	41	19	79,4	60,4	76
2	18/06/2012	4,5	27	4	0,3	44	14	8	66,3	22,3	34
3	18/06/2012	4,5	27	4	0,3	44	14	8	66,3	22,3	34
4	18/06/2012	5,0	26	3	0,3	30	13	9	52,3	22,3	43
5	18/06/2012	5,0	27	4	0,3	32	14	10	56,3	24,3	43
6	18/06/2012	5,0	27	4	0,3	32	14	10	56,3	24,3	43

Para a coleta de dados foram demarcadas na área quatro unidades experimentais compostas por cinco linhas de 15 m de comprimento. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (área homogênea), com cinco repetições.

Dados biométricos da cana-de-açúcar foram coletados em uma frequência quinzenal ao longo de todos os ciclos estudados, sendo selecionadas aleatoriamente cinco plantas em cada parcela experimental para a realização das coletas de dados. As alturas das plantas foram obtidas com o auxílio de uma trena, compreendendo o comprimento do colmo desde a sua base na superfície do solo até a inserção da última folha no ápice do colmo, sendo neste comprimento de colmo determinado o número de nós.

Para a obtenção do índice de área foliar (IAF), que é definido como a relação da área foliar por unidade de terreno (m² m⁻²), foi determinada a área foliar (AF, m²) conforme a metodologia descrita por Hermann & Câmara (1999), (Equação 3.1):

$$AF = C \cdot L \cdot 0,75 \cdot (N + 2) \quad [3.1]$$

em que C é o comprimento da folha +3, L é a largura na porção mediana da folha +3, 0,75 é o fator de correção para área foliar da cultura, e N é o número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde. E a área de solo foi obtida a partir do espaçamento entre linhas

de plantio e do número de perfilhos por metro linear (sendo o espaçamento entre linhas de plantio de 1,5 m e, em média, 14 colmos por metro linear, o que resultou em uma área de terreno igual a 0,107 m²).

A massa seca total da parte aérea foi obtida a partir da secagem dos colmos e folhas em estufa de circulação forçada a 70 °C até atingirem massa constante, procedendo-se as pesagens em balança digital.

Concomitantemente às análises biométricas foram determinados o teor de sólidos solúveis (°Brix) nos terços superior e inferior das amostras com auxílio do refratômetro digital de campo. Com os dados do teor de sólidos solúveis foi calculado o índice de maturação (IM) da cana-de-açúcar, conforme metodologia de Fernandes & Benda (1985), sendo obtido pela relação do teor de sólidos solúveis dos colmos do terço superior e inferior da cana. Os valores do IM são interpretados da seguinte forma: cana verde ($IM \leq 0,60$); cana em processo de maturação ($0,60 < IM \leq 0,85$); cana madura ($0,85 < IM \leq 1,00$) e cana em processo de declínio de sacarose ($IM > 1,00$).

As variáveis climáticas utilizadas foram obtidas da estação agrometeorológica automática da Embrapa - Arroz e Feijão, localizada em Santo Antônio de Goiás – GO, distante 7 km da área. Os dados das normais climatológicas provisórias são referentes da própria estação da Embrapa (http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAF/25089/1/doc_198.pdf).

Aplicou-se o balanço hídrico normal e sequencial semanal (7 dias), para a cultura da cana-de-açúcar, conforme metodologia estabelecida por Thornthwaite & Mather (1955), determinando a evapotranspiração de referência (ET_0) pelo método de Penman-Monteith, padrão FAO (Allen et al., 2006), com adequações na CAD (capacidade de água disponível), resultando em $CAD=95,14$ mm. Para esta adequação, um estudo preliminar descreveu a profundidade efetiva do sistema radicular e as características físico-hídricas do solo. Próximo à data dos cortes fez-se a avaliação visual do perfil do sistema radicular da cana-de-açúcar. Em cada unidade experimental foi aberta uma trincheira de $0,90 \times 0,60 \times 0,80$ m de comprimento, largura e profundidade, respectivamente, onde foi analisado o perfil de 0 a 0,80 m de profundidade, obtendo-se profundidade efetiva do sistema radicular médio igual a 0,60 m. Para a determinação do teor de água volumétrico (θ , m³ m⁻³), na capacidade de campo, foram coletados amostras indeformadas de solo nas profundidades 0,0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, em anéis volumétricos, de cada parcela experimental. As amostras de solo foram saturadas por 24 horas e colocadas para drenar

até a estabilização da sua massa, momento em que a condutividade hidráulica do solo tende à zero. Nesta situação, a umidade volumétrica média das amostras representa o teor de água na capacidade de campo ($\theta_{CC} = 0,399 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Posteriormente foi determinado o teor de água no ponto de murcha permanente a partir da curva de retenção de água obtida em laboratório usando-se extrator de Richards, de acordo com Embrapa (1997), sendo obtido $\theta_{PMP} = 0,240 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A lâmina de água crítica no solo foi obtida por meio do fator de disponibilidade hídrica no solo (f). Para a evapotranspiração máxima da cana-de-açúcar de 7 mm dia⁻¹ tem-se f=0,5 (Doorenbos & Kassam, 2000). Assim, a lâmina de água no solo facilmente disponível foi igual a 47,57 mm, correspondente à lâmina de água no solo de 191,61 mm ($\theta_{crít} = 0,319 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Os graus-dia (°C) foram determinados com base na metodologia descrita por Villa Nova et al. (1972). Assim, para cada dia, foi calculado o valor de graus-dia pelas seguintes Equações:

Se $T_m > T_b$ e $T_M < T_B$:

$$GD = \frac{(T_M - T_m)}{2} + (T_m - T_b) \quad [3.2]$$

Se $T_m \leq T_b$ e $T_M < T_B$:

$$GD = \frac{(T_M - T_b)^2}{2(T_M - T_m)} \quad [3.3]$$

Se $T_m > T_b$ e $T_M > T_B$:

$$GD = \frac{2 \cdot (T_M - T_m) \cdot (T_m - T_b) + (T_M - T_m)^2 - (T_M - T_B)^2}{2 \cdot (T_M - T_m)} \quad [3.4]$$

Se $T_m < T_b$ e $T_M > T_B$:

$$GD = \frac{(T_M - T_b)^2}{2(T_M - T_m)} - \frac{(T_M - T_B)^2}{2(T_M - T_m)} \quad [3.5]$$

Se $T_M < T_b$:

$$GD = 0 \quad [3.6]$$

em que T_M é a temperatura máxima diária abaixo de 38 °C (Fauconier & Bassereau, 1975); T_m a temperatura mínima diária acima de 7 °C (Waldron et al., 1967); T_b a temperatura basal mínima igual a 20 °C (Barbieri & Villa Nova, 1977); T_B a temperatura basal máxima igual a 35 °C (Pereira et al., 2015).

Foram ajustadas equações de regressão, com auxílio do software livre SciDAVis (<http://scidavis.sourceforge.net/index.html>), aos dados de altura da planta, índice de área foliar, fitomassa seca total, número de nós e teor de sólidos solúveis em função dos dias após o plantio/corte, graus-dia acumulado, evapotranspiração de referência acumulada e déficit hídrico acumulado. As equações utilizadas nos ajustes foram a sigmoideal (Equação 3.7) e o polinomial de segunda ordem (Equação 3.8).

$$y = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{(x-x_0)}{b}\right)} \quad [3.7]$$

$$y = x_0 + a \cdot x + b \cdot x^2 \quad [3.8]$$

Os valores estimados pelos modelos de regressão foram avaliados a partir do erro padrão de estimativa (EPE) (Equação 3.9), do erro quadrático médio (EQM) (Equação 3.10), a raiz do erro quadrático médio (REQM) (Equação 3.11) e o erro médio absoluto (EMA) (Equação 3.12).

A qualidade do ajuste obtida pelos modelos foi dada pelo coeficiente de determinação (R^2) (Equação 3.13), a qual indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total. A qualidade do ajuste (exatidão) está relacionada à aproximação dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, essa aproximação é determinada pelo índice designado de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (Equação 3.14) (Willmott et al., 1985), no qual seus valores variam de zero a 1 indicando nenhuma concordância e concordância perfeita, respectivamente.

O desempenho dos modelos também foi avaliado a partir da metodologia proposta por Camargo & Sentelhas (1997), utilizando-se o índice de confiança (c) (Equação 3.16), em que r é o coeficiente de correlação simples de Person (Equação 3.15) e d é o índice de concordância de Willmott. De acordo com os autores, o coeficiente c é interpretado como: "ótimo" ($c > 0,85$); "muito bom" (c entre 0,76 e 0,85); "bom" (c entre 0,66 e 0,75); "mediano" (c entre 0,61 e 0,65), "sofrível" (c entre 0,51 e 0,60), "mau" (c entre 0,41 e 0,50) e "péssimo" ($c < 0,40$).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n - 1}} \quad [3.9]$$

$$EQM = \sqrt{\sum(O_i - E_i)^2} \quad [3.10]$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n}} \quad [3.11]$$

$$EMA = \frac{1}{n} \cdot \sum |O_i - E_i| \quad [3.12]$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad [3.13]$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(|O_i - E_i| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad [3.14]$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2}} \quad [3.15]$$

$$c = d \cdot r \quad [3.16]$$

sendo O_i o valor observado, E_i o valor estimado e \bar{O} a média dos valores observados.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Caracterização agrometeorológica e do déficit hídrico do solo de Santo Antônio de Goiás - GO

O município de Santo Antônio de Goiás possui variação sazonal tanto do regime térmico quanto do regime hídrico, apresentando verão chuvoso e inverno seco (Figura 3.1 A e B), tendo as temperaturas mais elevadas no mês de setembro (31,5 °C) e temperaturas mínimas no mês de junho (14,2 °C).

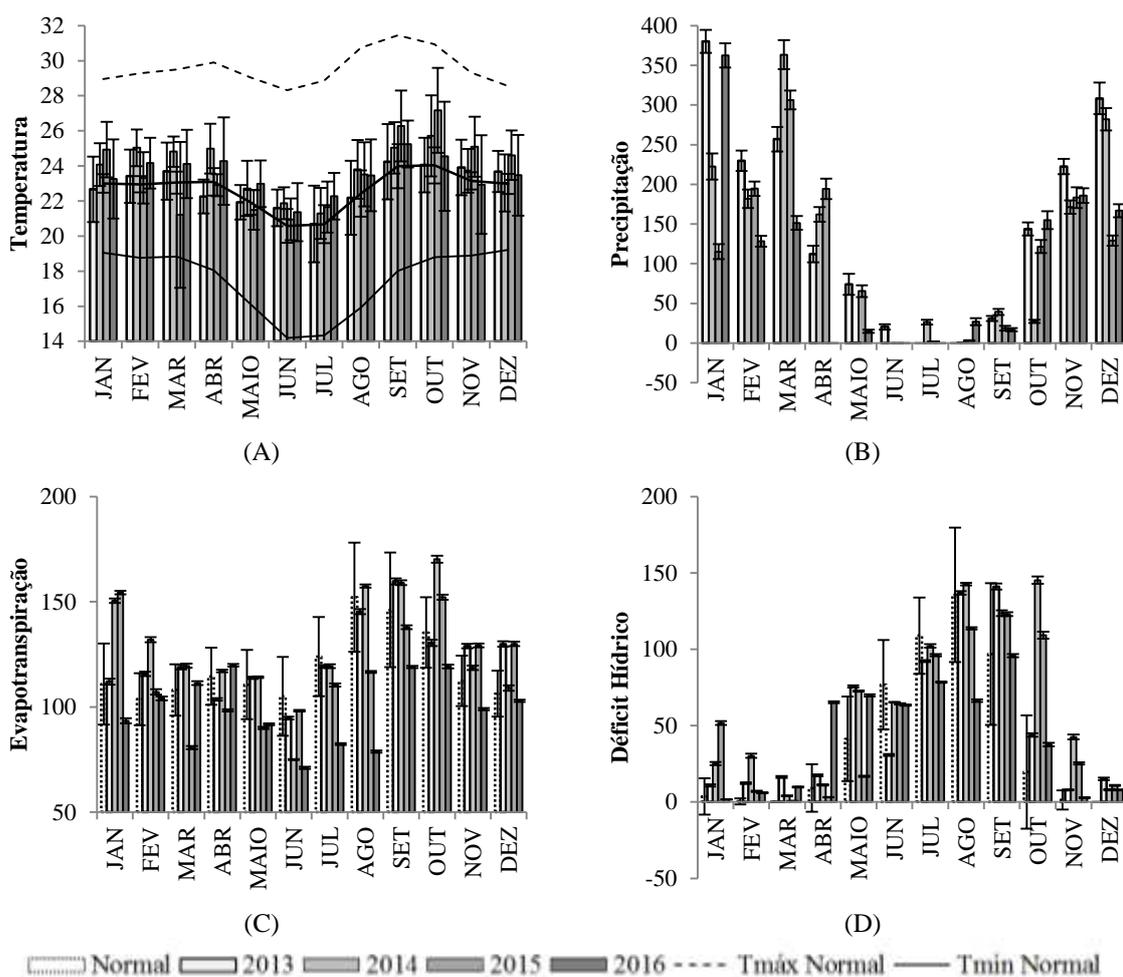


Figura 3.1. Variação mensal e desvio padrão da temperatura média do ar, °C (A), precipitação, mm (B), evapotranspiração de referência, mm (C) e déficit hídrico, mm (D) em Santo Antônio de Goiás, Goiás, durante o período de 1983-2004 e dos anos de 2013 a 2016.

O total pluviométrico do município é de 1481,3 mm, sendo que cerca de 93% desse total ocorre entre os meses de outubro a abril. A maior lâmina de precipitação ocorre no mês de dezembro (239,2 mm), enquanto a mínima ocorre em julho (4,7 mm). Entre os anos de 2013 a 2016 a precipitação não apresentou valores semelhantes aos observados na média do período de 1983-2004 (Figura 3.1 B), onde se registrou, para o período entre junho e setembro, precipitação média 41% abaixo do esperado.

Os valores da evapotranspiração de referência, ET_0 , (Figura 3.1 C) indicam que a máxima demanda hídrica atmosférica ocorre nos meses de agosto (152,1 mm) e setembro (146,2 mm). Influenciado por maiores valores de ET_0 e por baixas lâminas de precipitação, o déficit hídrico apresenta maiores valores nos meses de julho (108,9 mm), agosto (135,7

mm) e setembro (96,8 mm) (Figura 3.1 D). Nos períodos de avaliação foram observadas variabilidades médias de precipitação igual a $\sigma=49,4$ mm, e de déficit hídrico $\sigma=20,8$ mm.

As características agroclimáticas do município de Santo Antônio de Goiás atendem as exigências da cana-de-açúcar, visto que, para a produção comercial, o ambiente deve ser quente e úmido na fase de perfilhamento e crescimento da cultura, com temperatura média do ar entre 25 e 35 °C (Barbieri e Villa Nova, 1977; Doorembos & Kassam, 1994) e disponibilidade hídrica acumulada de 1500 mm (Doorembos & Kassam, 2000). Para o período dos anos-safras estudados (2013-2016), a variação térmica mensal permaneceu dentro da tendência descrita pela média do período de 1983-2004, o que resultou na ocorrência predominante de temperaturas médias acima de 20 °C (Figura 3.1 A). Contudo, segundo André et al. (2010), em locais onde a temperatura não limita o crescimento, a maturação da cana-de-açúcar é induzida, principalmente, pela ocorrência de déficit hídrico no solo.

A variabilidade interanual observada tanto para a precipitação quanto para a ET_0 refletiu no balanço hídrico mensal do município de Santo Antônio de Goiás (Figura 3.2). Pelos valores normais, as lâminas anuais de excedente e déficit hídrico são de 486,12 e 442,95 mm, respectivamente. Foram observadas lâminas de excedentes e déficit, respectivamente, de 718,68 e 412,85 mm (2013); 541,40 e 605,92 mm (2014); 349,38 e 421,17 mm (2015) e 425,01 e 409,62 mm (2016). Os valores apresentados de lâmina de água resultantes do balanço hídrico (i.e., excedente hídrico e déficit hídrico) não apresentaram diferença significativa ($p>0,05$) entre os anos estudados e os dados obtidos a partir da média do período de 1983-2004.

Os déficits hídricos ocorreram predominantemente entre os meses de maio a setembro (Figura 3.2). Contudo, o ano de 2015 apresentou lâmina de déficit hídrico nos meses de janeiro e dezembro (Figura 3.2 D), momentos em que a cana-de-açúcar estava na fase inicial de crescimento (perfilhamento e alongamento dos colmos; cerca de 62 a 123 dias após o corte) nas safras 2014/15 e 2015/16, respectivamente.

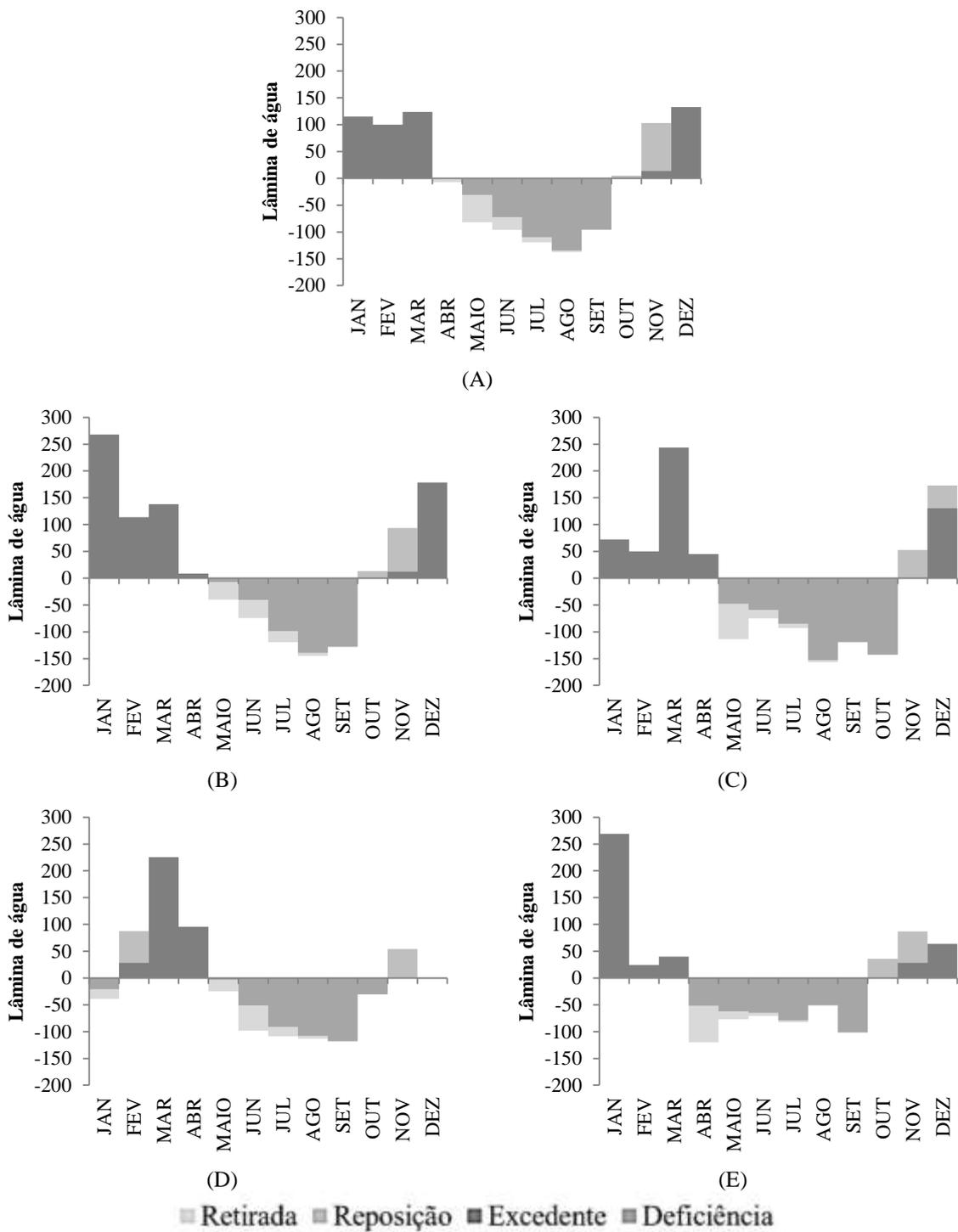


Figura 3.2. Balanço hídrico climatológico, mm, média do período de 1983-2004 (A) e dos anos de 2013 (B), 2014 (C), 2015 (D) e 2016 (E) em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

3.3.2 Caracterização do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar

As condições climáticas e de lâmina de água no solo influenciaram no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, resultando em respostas distintas entre as safras. Espécies vegetais em condição de restrição hídrica apresentam redução na síntese de carboidratos com consequente redução da taxa fotossintética (Taiz & Zeiger, 2013). A cana-de-açúcar submetida ao déficit hídrico apresenta redução significativa da carboxilação de Rubisco e PEPCase, que são os principais fatores de redução na fotossíntese (Barbosa et al., 2015) e, conseqüentemente, evidenciam-se reduções na altura dos colmos, número de folhas, área foliar e fitomassa, além de outras respostas fisiológicas (Silva et al., 2008; Zhao et al., 2013; Santos et al., 2015).

A taxa de altura da cana-de-açúcar foi influenciada de forma negativa pela ocorrência de lâmina de água no solo abaixo da lâmina de água referente à umidade crítica ($\theta_{\text{crít}} = 0,319 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para a cultura (Figura 3.3). Na safra 2014/15 foi observada redução de 55% na taxa média de altura da cultura para lâmina de déficit hídrico acumulado de 236,5 mm, cerca de 280 dias após o corte (DAC), isto é, primeira semana do mês de julho. Nesta safra, a lâmina de água do solo foi menor que a lâmina de 191,61 mm, referente à umidade crítica, na primeira semana do mês de junho.

Na safra seguinte a lâmina de água no solo apresentou valores abaixo do valor crítico na terceira semana do mês de abril, enquanto que a taxa média de altura decresceu próximo aos 205 DAC (quarta semana do mês de abril), apresentando lâmina de 131 mm de déficit hídrico acumulado para lâmina de água no solo igual a 172,43 mm ($\theta = 0,287 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Foi observado que a taxa média de altura apresentou nova redução, de 0,007 para $0,002 \text{ m dia}^{-1}$, cerca de 280 DAC, momento em que o déficit hídrico acumulado foi de 259,94 mm.

A taxa de altura da safra 2014/15 foi, em média, 40,2% maior que o observado na safra 2015/16. A taxa média de crescimento final da safra 2013/14 foi cerca de 89 e 38% menor que as observadas nas safras 2014/15 e 2015/16, respectivamente, visto que a lâmina de água do solo se apresentou abaixo de 191,61 mm na segunda semana do mês de maio de 2014. Apesar do comportamento observado para as taxas médias de altura, as alturas máximas observadas a partir de 280 DAC foram em média de 3,72; 2,73 e 2,03 m nas safras 2013/14, 2014/15 e 2015/16, respectivamente.

Como padrão médio, observou-se que a taxa de altura da cana-de-açúcar apresentou redução superior a 40% quando a lâmina de água no solo ficou abaixo da umidade crítica do solo (condição de déficit hídrico), para uma lâmina de déficit hídrico acumulado superior a 130 mm. Estes resultados foram similares aos observados por Hemaprabha et al. (2004), que constataram redução média de 48,79% na altura de 97 variedades de cana-de-açúcar em situação de déficit hídrico, o que afetou o acúmulo de massa da cultura, com redução de 64,16%. Já Ecco et al. (2014) investigaram a resposta da cana-de-açúcar, variedades RB855536 e RB867515, ao déficit hídrico (20 a 40% da capacidade de campo) e obtiveram como resultado redução média no alongamento e diâmetro dos colmos de 60 e 65%, respectivamente.

Assim como a altura, o índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar também teve seu comportamento influenciado pela lâmina de água presente no solo (Figura 3.4). Isto ocorre devido ao estresse hídrico provocado pelo déficit hídrico do solo que está intimamente ligada à redução das taxas fotossintéticas, ocasionando severa redução na síntese de carboidratos, na expansão foliar e na alongação dos entrenós (Taiz & Zeiger, 2013).

Para cana-1ª soca (safra 2014/15, Figura 3.4 C e D), foi observado valor máximo de IAF de $5,38 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ aos 242 DAC (quarta semana do mês de maio). Neste momento, a lâmina de água no solo foi de 203,17 mm ($\theta=0,339 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para déficit hídrico acumulado de 156,43 mm e graus-dia acumulados (GDA) de 979,21 °C. Inicialmente, a taxa média de crescimento do IAF foi de $0,019 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, reduzindo-se para 0,017 e $0,006 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ aos 150 e 280 DAC, respectivamente.

Na cana-2ª soca (Figura 3.4 E e F) o IAF máximo observado foi de $3,62 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ que ocorreu na quarta semana de abril, aos 205 DAC, período em que a lâmina de água no solo foi igual a 172,43 mm. O déficit hídrico e os graus-dia acumulados foram de 130,27 mm e 1044,61 °C. O comportamento da taxa média de crescimento dessa safra seguiu a mesma tendência da safra anterior, uma vez que foram observadas sucessivas reduções nas taxas de IAF ($0,046$ para $-0,008 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e posteriormente $-0,0013 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

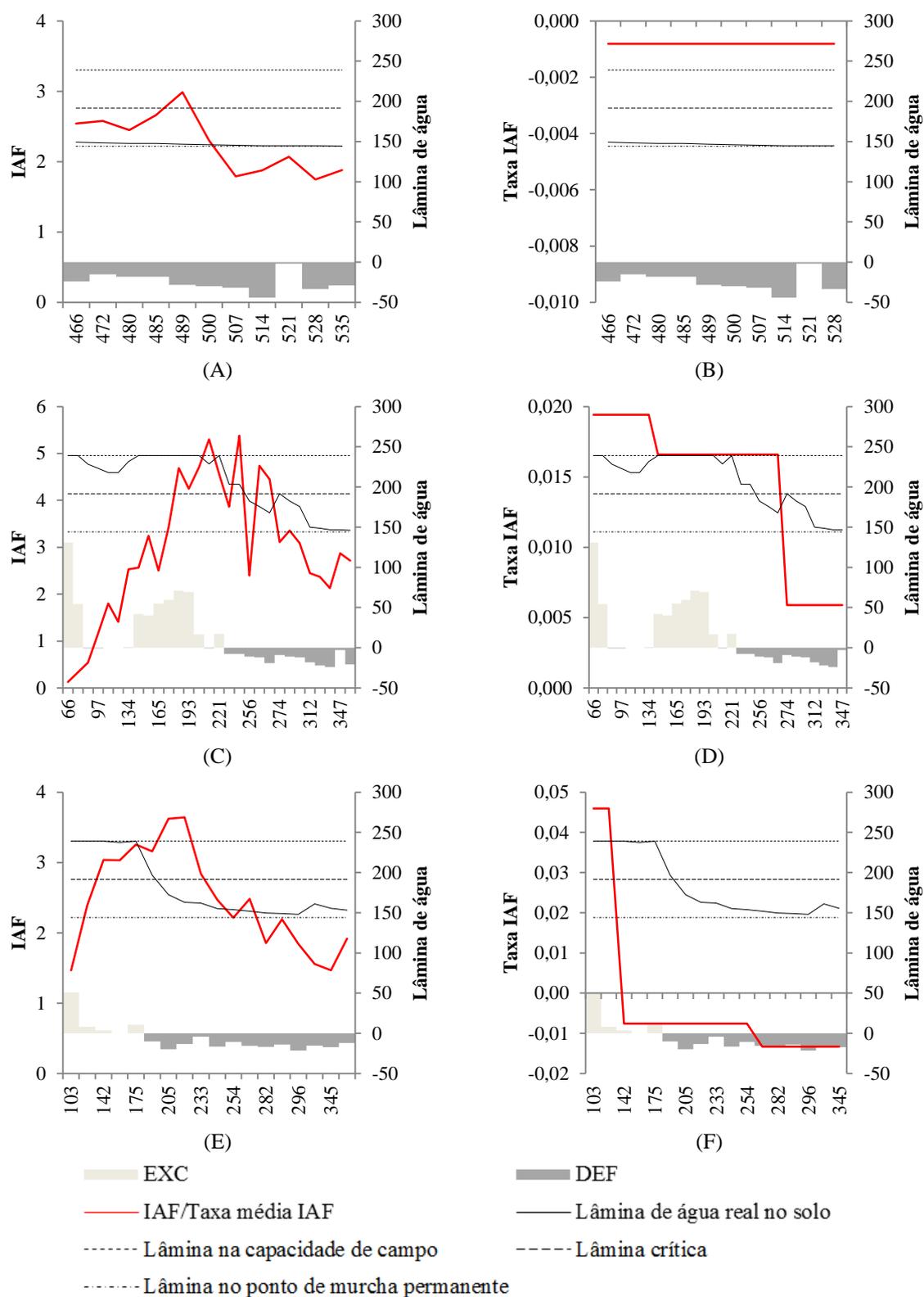


Figura 3.4. Índice de área foliar, m² m⁻² (IAF) (A), (C) e (E) e taxa média do índice de área foliar m² m⁻² dia⁻¹ (B), (D) e (F) em relação às lâminas de água do solo, mm, ao longo das safras da cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16), respectivamente, em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

Teruel et al. (1997) obtiveram para o ciclo de cana-1^asoca e cana-2^asoca, variedade CB 47-355 cultivada em sistema irrigado, IAF máximo superior a $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para graus-dia acumulado entre 650 a 900 °C. Almeida et al. (2008) trabalharam com quatro diferentes variedades de cana-de-açúcar em sistema irrigado e observaram IAF máximo próximo de $4,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, no ciclo de cana-1^asoca, entre 600 e 950 graus-dia acumulado. Estes resultados se diferem dos obtidos nesse trabalho, visto que o efeito do déficit hídrico do solo sobre o IAF não é linear, sendo este efeito variável em função do nível de déficit hídrico e do estágio fenológico da cultura (Teruel et al., 1997).

No período de maturação da cana-de-açúcar, em todas as safras estudadas, foi observada a redução dos valores de IAF, sendo obtidos valores médios de $2,26 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para cana-planta, IAF igual a $2,71 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ no ciclo da cana-1^asoca e $1,81 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ na 2^asoca. Nas respectivas safras os GDA até o início do processo de maturação (466 dias após o plantio na cana-planta e 280 dias após o corte nos ciclos de cana-soca) foram de 1650,39; 1074,98 e 1304,48 °C. Teruel et al. (1997) não encontraram diferença significativa de IAF entre os ciclos de cana-soca e obtiveram valores inferiores a $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ no final do ciclo, quando se atingiu cerca de 1100 °C de graus-dia acumulado, caracterizando o início da fase de maturação.

Nos primeiros 150 dias após o corte (DAC), observou-se que a taxa média do IAF da safra 2015/16 foi 58% maior quando comparada à safra 2014/15. Na safra 2014/15, para este mesmo período, foi observado lâmina de déficit hídrico acumulado de 146,55 mm (quando a lâmina de água no solo se encontrava a 64% da capacidade de campo), em comparação com 77,58 mm de déficit hídrico acumulado (99% da capacidade de campo) neste período na safra 2015/16, o que pode ter influenciado o crescimento foliar. Essa diferença de IAF entre as safras, observada nos primeiros 150 DAC, pode ser devido ao déficit hídrico, pois, de acordo com Barbosa et al. (2015), em folhas jovens de cana-de-açúcar o déficit hídrico induz a redução da taxa fotossintética devido à alta sensibilidade da atividade da PEPCase, maiores limitações estomáticas e maior fotorrespiração em comparação com as folhas maduras e senescentes submetidas de forma semelhante ao déficit hídrico. Estes autores observaram redução de 64% da área foliar da cana-de-açúcar submetida ao déficit hídrico (20% da capacidade de campo) quando comparadas com plantas cultivadas na umidade de capacidade de campo.

O comportamento da altura e IAF da cana-de-açúcar em função da lâmina de água no solo refletiram nos valores de fitomassa seca da parte aérea (FMS) (Figura 3.5 D).

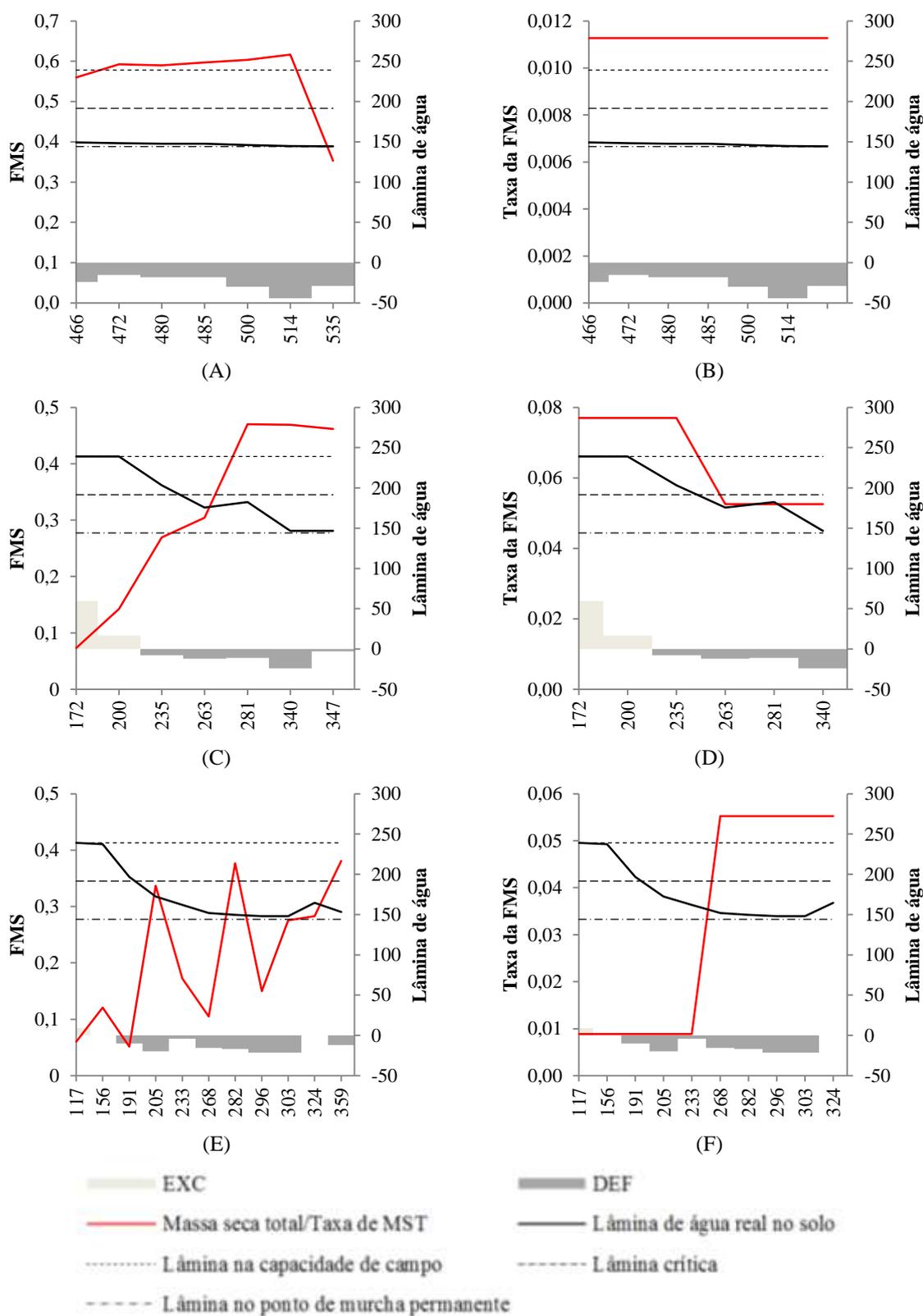


Figura 3.5. Fitomassa seca da parte aérea (FMS), kg (A), (C) e (E) e taxa média da fitomassa seca da parte aérea, kg dia⁻¹ (B), (D) e (F) em relação às lâminas de água do solo, mm, ao longo das safras da cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16), respectivamente, em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

Na safra 2014/15 redução tanto na taxa de altura (Figura 3.3 D) quanto na taxa de IAF (Figura 3.4 D) aos 280 DAC, observados na safra 2014/15, resultou em comportamento similar da FMS, do qual apresentou taxa média de $0,077 \text{ kg dia}^{-1}$ e posterior redução para $0,053 \text{ kg dia}^{-1}$, momento em que a lâmina de água no solo era de 182,50 mm (abaixo da lâmina crítica).

Outros pesquisadores também observaram redução nos valores de fitomassa seca da parte aérea devido à ocorrência do déficit hídrico. Ecco et al. (2014) estudaram as respostas biométricas de duas variedades de plantas jovens de cana-de-açúcar expostas a condição de déficit hídrico (20 a 40% da capacidade de campo). Para essa condições foi constatado redução na massa da parte aérea total em média de 83% quando comparadas aos valores obtidos para cultura produzida sob condições ótimas de disponibilidade hídrica. Barbosa et al. (2015) avaliaram a produção de biomassa da cana-de-açúcar, variedade RB86-7515, em condição de déficit hídrico (20% da capacidade de campo) e observaram que a fitomassa seca acumulada em plantas expostas ao déficit hídrico foi 3,6 vezes menor do que em plantas com disponibilidade hídrica adequada (100% da capacidade de campo). Zhao et al. (2013) observaram para as variedades de cana-de-açúcar CP 01-2390 e CP 80-1743 que o déficit hídrico no solo (provocados a partir dos 55 DAC) provocou reduções de 70 e 45% na fitomassa verde foliar e nos colmos, respectivamente, quando comparadas com as fitomassas de plantas cultivadas em solo na capacidade de campo. De acordo com Silva et al. (2012), a redução da fitomassa da parte aérea ocorre em resposta à paralização de crescimento do colmo e redução do índice de área foliar da cana-de-açúcar.

Ressalta-se que além da ocorrência do déficit hídrico, a fase fenológica da cultura no momento da ocorrência do déficit também influencia de maneira distinta no rendimento final da cana-de-açúcar. Doorenbos & Kassam (2000) quantificaram empiricamente o efeito da água sobre diversas culturas e estabeleceram um fator que correlaciona o deplecionamento do rendimento e o déficit de evapotranspiração, que foi denominado como fator de resposta da cultura (ky). Segundo este estudo, na cana-de-açúcar o efeito do déficit hídrico sobre o rendimento da cultura é acentuado no período vegetativo ($ky=0,75$) e na formação da colheita ($ky=0,50$), enquanto no período de maturação o efeito da água tem baixa influência sobre o rendimento ($ky=0,10$).

Os valores das taxas médias de FMS da safra 2015/16 foram de $0,009 \text{ kg dia}^{-1}$ até 280 DAC, para lâmina de 259,94 mm de déficit hídrico acumulado, e, a partir desta data, $0,055 \text{ kg dia}^{-1}$ (Figura 3.5 F). Este aumento de 84% da taxa ocorreu devido ao

aumento de 66% do número de folhas totais nas plantas observado a partir dos 280 DAC. Contudo, ressalta-se também que o aumento do aparato fotossintético da cana-de-açúcar contribui positivamente para o acúmulo de fotoassimilados e otimiza o aproveitamento da radiação solar, resultando em aumento de biomassa (Almeida et al., 2008). De acordo com esses autores, o incremento de matéria seca pode ser de até 47%.

Para a cana-de-açúcar, a ocorrência de déficit hídrico no solo nos estádios fenológicos de emergência e perfilhamento causam prejuízos à produtividade final (Cintra et al., 2008). Para as safras estudadas (2014/15 e 2015/16), a lâmina de déficit hídrico acumulado no solo até aos 150 DAC (que, segundo Dinardo-Miranda et al. (2010) e Jadoski et al. (2010), representa o período máximo até o término das fases de brotação e perfilhamento) não foi suficiente para interferir no rendimento final da cultura. Para este período, o déficit hídrico acumulado na safra 2014/15 foi de 146,55 mm, enquanto na safra 2015/16, para o mesmo período, esta lâmina foi igual a 77,58 mm, e as produtividades finais alcançadas foram de 64,15 e 49,06 TCH (toneladas de colmos por hectare), respectivamente. Apesar das diferentes lâminas de déficit hídrico entre as safras, foi observado que as lâminas de água no solo, dentro dos 150 DAC, ficaram acima do θ_{crit} (191,61 mm).

Para o número de nós, em todas as safras estudadas foi observado uma fase inicial (até cerca de 150 DAC) de incremento lento, com posterior acentuação da taxa e, a partir de 280 DAC, novamente observado menor aumento do número de nós (Figura 3.6).

Na cana-1^asoca (Figuras 3.6 C e D) não houve formação de entrenós até, cerca de, 118 DAC, período em que a lâmina de déficit hídrico acumulado foi de 146,24 mm, resultando em uma taxa média de 0,007 nós dia⁻¹. A partir desta data, segunda semana de fevereiro (GDA=546,64 °C), até 280 DAC (segunda semana de julho) a lâmina de água no solo se manteve, praticamente em todo o período, acima do valor para umidade crítica, e, por vezes, na capacidade de campo, havendo expressivo aumento do número de nós, com taxa média igual a 0,153 nós dia⁻¹. Então, houve redução da taxa (0,005 nós dia⁻¹) na ocorrência de lâmina de água no solo abaixo de 191,61 mm (lâmina de água no solo correspondente ao θ_{crit}), da qual foi observada a partir da primeira semana do mês de junho.

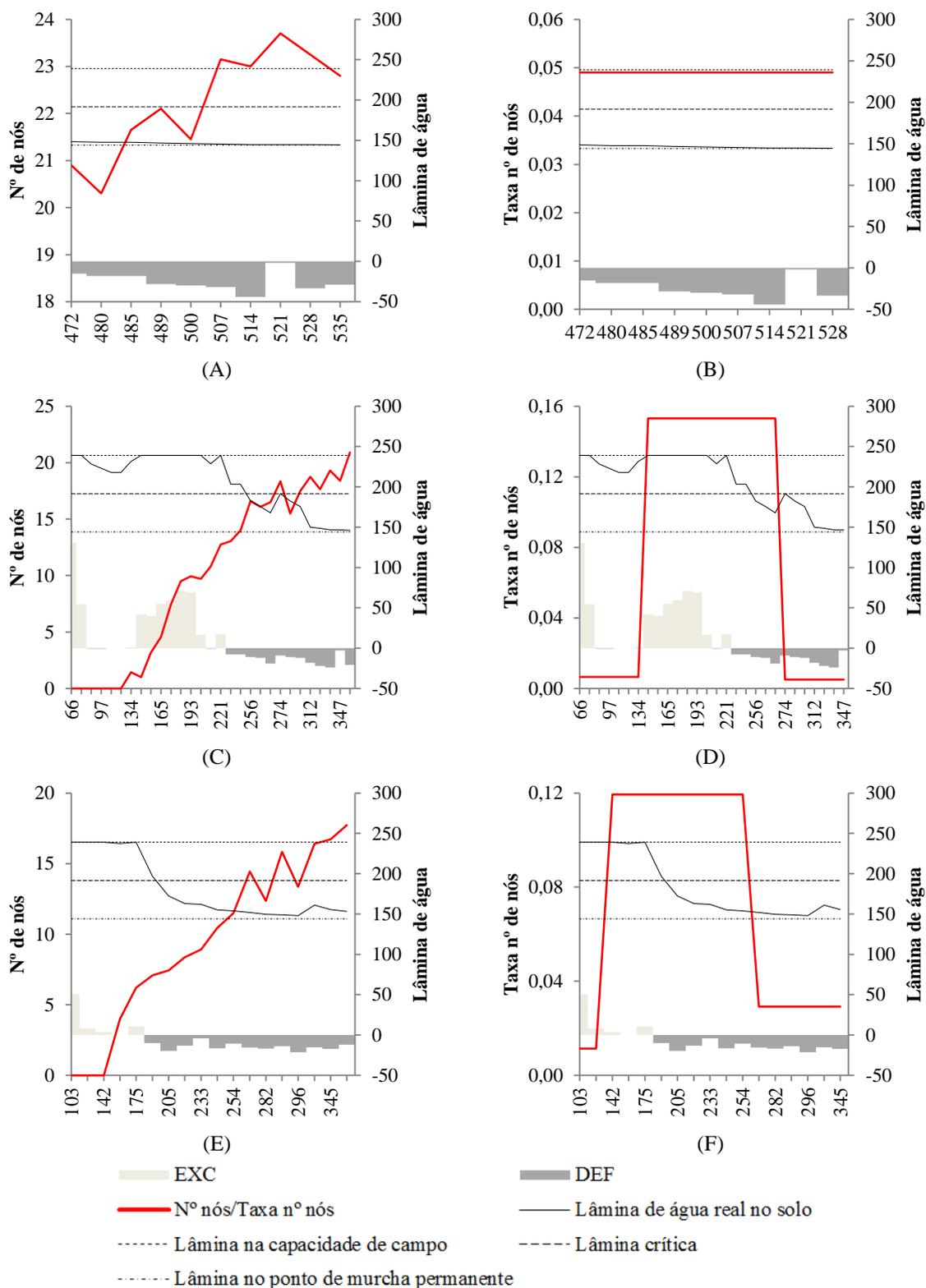


Figura 3.6. Número de nós (A), (C) e (E) e taxa média do número de nós, dia⁻¹ (B), (D) e (F) em relação às lâminas de água do solo, mm, ao longo das safras da cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16), respectivamente, em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

Inicialmente (até 150 DAC), a taxa média do número de nós da cana-2ªsoca foi igual a 0,011 nós dia⁻¹, sendo observado a formação de entrenós a partir de 156 DAC (Figuras 3.6 E e F) para lâmina de déficit hídrico acumulado igual a 77,58 mm e 792,07 °C acumulado, podendo ter apresentado maior taxa de número de nós quando comparada à safra anterior, para o mesmo período, devido à maior disponibilidade hídrica do solo e ao maior valor de graus-dia acumulado. Houve elevação da taxa para 0,119 nós dia⁻¹ até 280 DAC, momento em que a taxa média reduziu para 0,029 nós dia⁻¹. Nesses períodos, as lâminas médias de água reais no solo foram de 218,26 mm ($\theta = 0,364 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), 183,02 mm ($\theta = 0,305 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e 153,40 mm ($\theta = 0,256 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), respectivamente. Ressalta-se que nesta safra a lâmina de água no solo para a cana-de-açúcar ficou abaixo da lâmina referente à umidade crítica a partir da terceira semana de abril (205 DAC).

Para a cana-planta foi observado elevada taxa média do número de nós (0,049 nós dia⁻¹) quando comparado aos valores das demais safras para o período de maturação, mesmo a lâmina de água no solo sendo de 146,47 mm ($\theta = 0,244 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), semelhante às demais safras.

Outros estudos também sugerem que a lâmina de água presente no solo influencia o número de nós da cana-de-açúcar. Zhao et al. (2013) estudaram os efeitos do déficit hídrico no crescimento de duas variedades de cana-de-açúcar (CP 01-2390 e CP 80-1743), e observaram reduções de 23 a 62% no número de nós em dois ciclos de cana-soca submetidos ao déficit hídrico a partir dos 55 DAC.

De acordo com Inman-Bamber et al. (2008), o déficit hídrico prejudica o crescimento e desenvolvimento dos colmos da cana-de-açúcar devidos reduções na divisão celular.

O teor de sólidos solúveis na calda da cana-de-açúcar apresentou comportamento distinto entre as safras (Figura 3.7).

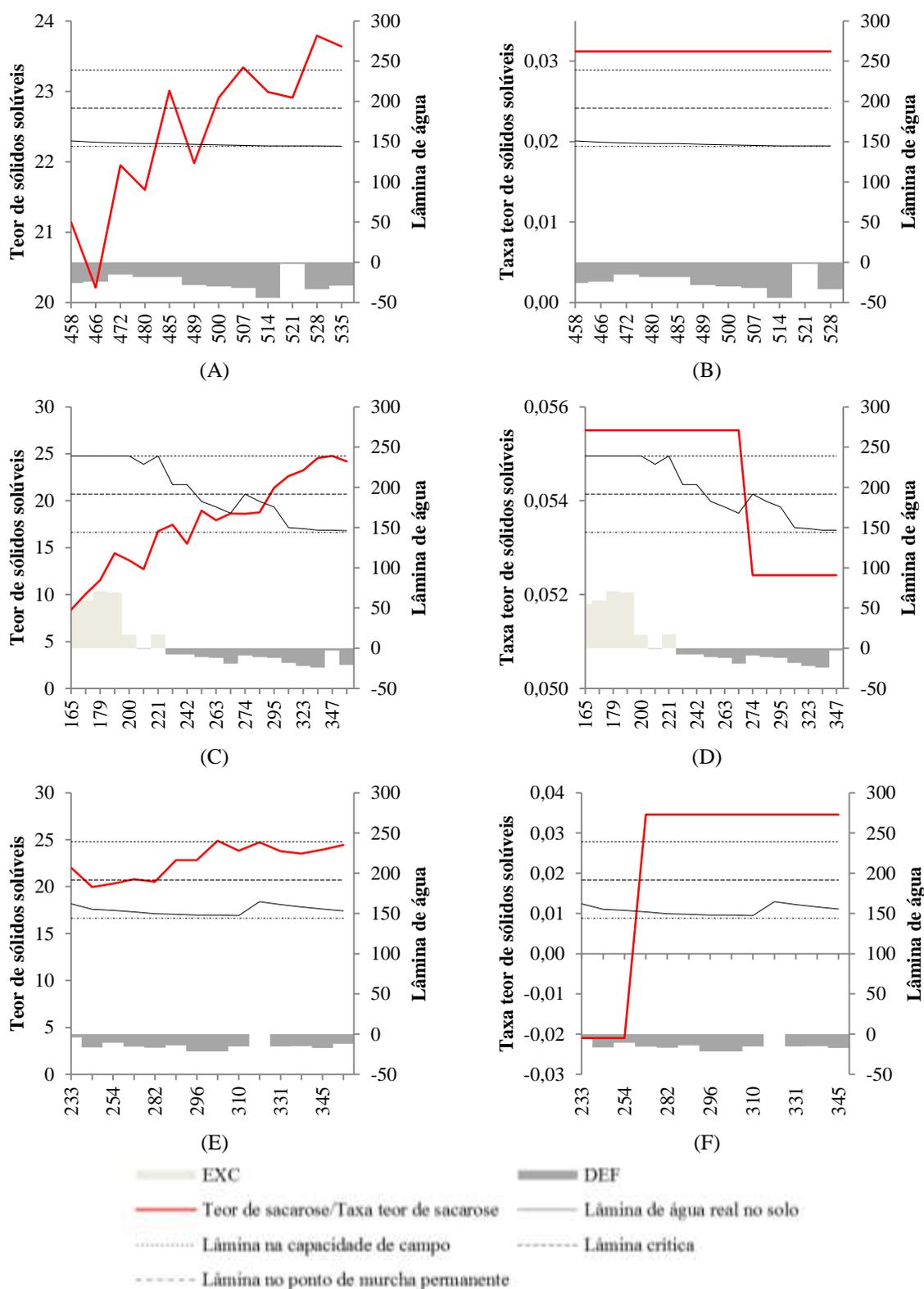


Figura 3.7. Teor de sólidos solúveis, °Brix (A), (C) e (E) e taxa média de sacarose, °Brix dia⁻¹ (B), (D) e (F) em relação às lâminas de água do solo, mm, ao longo das safras da cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16), respectivamente, em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

Na safra 2013/14 (Figuras 3.7 A e B) foi observada taxa média de teor de sólidos solúveis igual a $0,031 \text{ }^\circ\text{Brix dia}^{-1}$ a partir de 458 dias após o plantio (início da coleta de dados dessa safra), momento em que a cana-de-açúcar estava em processo de maturação (IM=0,78). A lâmina de déficit hídrico acumulado foi de 658,00 mm e a lâmina real de água no solo igual a 150,89 mm (63% da capacidade de campo), para 1628,61 $^\circ\text{C}$ acumulados. Nesse período foram registrados apenas três dias de temperatura média do ar abaixo da temperatura basal inferior da cana-de-açúcar de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Barbieri & Villa Nova, 1977), sendo que o aumento no teor de sólidos solúveis foi acompanhado por elevação na temperatura do ar ($5,14 \text{ }^\circ\text{C}$ de amplitude térmica), com $r=0,7$, isto é, para as presentes condições de cultivo o processo de maturação não foi influenciado pela ocorrência de estresse térmico.

A safra 2014/15 apresentou, ainda no subperíodo de crescimento vegetativo (até 280 DAC), lâmina de déficit hídrico acumulado de 236,50 mm, que resultou em taxa média do teor de sólidos solúveis de $0,055 \text{ }^\circ\text{Brix dia}^{-1}$, tendo sensível queda nesta taxa para $0,052 \text{ }^\circ\text{Brix dia}^{-1}$ (Figuras 3.7 C e D), no qual totalizou déficit hídrico acumulado de 418,73 mm. Nesta safra houve menos de 10 dias, não consecutivos, nos meses de junho e julho, em que a temperatura média do ar esteve abaixo de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, isto é, abaixo da temperatura basal inferior da cana-de-açúcar (Barbieri & Villa Nova, 1977), sendo constatado que a redução da temperatura não contribuiu com o acúmulo de sacarose ($r=0,4$).

A lâmina de déficit hídrico acumulada na safra 2015/16, até 280 DAC, foi de 230,2 mm, para uma taxa média de teor de sólidos solúveis igual a $-0,021 \text{ }^\circ\text{Brix dia}^{-1}$ (Figuras 3.7 E e F). A safra entrou na maturação com taxa média do teor de sólidos solúveis de $0,035 \text{ }^\circ\text{Brix dia}^{-1}$, e acúmulo de 395,27 mm de déficit hídrico. Esta safra também apresentou menos de 10 dias com temperatura média do ar inferior a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura basal inferior da cana-de-açúcar (Barbieri & Villa Nova, 1977), não sendo observado mais que três dias consecutivos com baixas temperaturas, sendo que estas foram observadas principalmente nos meses de junho e julho. Para este ano-safra, estas temperaturas mais amenas não influenciaram o acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar ($r=0,2$).

Nas safras analisadas foi constatado déficit hídrico acumulado ao longo dos 80 dias antes do corte, momento em que a cana-de-açúcar estava em processo de maturação (i.e., índice de maturação entre 0,60 e 0,85), de 214,50 mm (2013/14), 192,91 mm

(2014/15) e 107,20 mm (2015/16) para graus-dia acumulados ao longo da safra de 1658,58, 1134,89 e 1378,19 °C, respectivamente. Nesse momento os teores médios de sacarose acumulados foram 21,1 °Brix (2013/14), 18,6 °Brix (2014/15) e 20,5 °Brix (2015/16) e teor de sólidos solúveis no final das respectivas safras, isto é, na colheita, foram iguais a 23,7; 24,8 e 24,4 °Brix. Assim, a partir desses resultados e considerando as taxas de teor de sólidos solúveis, o valor de 192,91 mm parece ser o déficit hídrico crítico para início da redução das taxas do teor de sólidos solúveis. Esta lâmina de déficit hídrico é superior aos resultados encontrados em outras pesquisas. De acordo com Scarpari & Beauclair (2004), uma lâmina de déficit acumulado superior a 130 mm em quatro meses que antecedem a colheita afeta o acúmulo de sacarose nos colmos. Inman-Bamber (2004) concluiu que o acúmulo de sacarose é reduzido (34%) com o déficit hídrico superior a 145 mm.

Outros estudos indicaram que a cana-de-açúcar é mais sensível ao déficit hídrico na fase de crescimento (alongamento dos colmos), momento em que ocorre expansão foliar acentuada e maior demanda hídrica e troca de gases com a atmosfera (Dinardo-Miranda et al., 2010), o que pode resultar em prejuízo no acúmulo de sacarose (Silva & Costa, 2009). Segundo Machado et al. (2009), o déficit hídrico (40% da capacidade de campo) prejudica o acúmulo de sacarose nos colmos de cana-de-açúcar quando este ocorre no período vegetativo, sendo observada uma redução em cerca de 25%. Para o mesmo déficit hídrico no período de maturação, não foram observadas variações significativas nos valores de sacarose. Já Robertson et al. (1999) afirmaram que o déficit hídrico prejudica significativamente a concentração de sacarose na cana-de-açúcar quando a cultura apresenta IAF maior que 2 e quando o déficit hídrico acarreta na redução de 50% da fitomassa do colmo (comparada com a fitomassa de plantas sem déficit hídrico).

Cardozo & Sentelhas (2013) afirmam que ainda não é conhecida a lâmina de água ótima no solo para o processo de maturação da cana-de-açúcar. Esta lâmina ótima seria aquela capaz de manter a fitomassa da planta, favorecer a concentração de sacarose nos colmos e ainda permitir a continuidade do processo de síntese de sacarose (Araújo et al., 2016). Entende-se que a identificação de uma lâmina de água no solo específica e ótima responsável pelo início do processo de maturação da cana-de-açúcar é de difícil determinação, visto que a cultura pode ser exposta a distintas condições de ambiente e de manejo ao longo de suas fases fenológicas e o teor de sólidos solúveis é função destas condições.

Quanto aos teores de sacarose na fase final da maturação, isto é, 535 dias após o plantio na safra 2013/14 e 360 DAC nas safras 2014/15 e 2015/16, os ciclos de cana-soca apresentaram valores superiores ($\geq 24,4$ °Brix) em comparação ao teor obtido no ciclo da cana-planta (23,7 °Brix). Este resultados são corroborados com os apresentados por Batta et al. (2011), que obtiveram maior valor de sacarose no ciclo de cana-soca (215,6 mg g⁻¹) que no ciclo de cana-planta (188,2 mg g⁻¹), e, de acordo com os autores, este resultado indica o maior potencial da soca em armazenar os fotoassimilados translocados pelas folhas, além de indicar uma melhor qualidade do caldo da cana-soca. Simões et al. (2015) também encontraram diferenças significativas no teor de sólidos solúveis entre ciclos de cana-planta e cana-soca, sendo que essa diferença foi atribuída às condições do ambiente, especificamente à redução dos índices de precipitação que podem ter contribuído com o maior teor de sólidos solúveis. Segundo estes autores, para cana-planta o teor de sólidos solúveis foi de 21,9 °Brix, e para os ciclos de 1^a e 2^a soca os valores foram de 22,9 e 23,6 °Brix, respectivamente.

Para os ciclos de cana-soca, os excedentes hídricos acumulados até 150 DAC foram de 247,98 mm (para lâmina de água real média no solo de 200,61 mm) e 380,91 mm (com lâmina real média de 218,26 mm) para as safras 2014/15 e 2015/16, respectivamente. A disponibilidade hídrica no início da safra 2015/16 pode ter inibido o acúmulo de sacarose nos colmos nesse período, ou seja, os fotoassimilados produzidos foram utilizados para a produção de fitomassa da planta, o que refletiu em maiores taxas de altura, IAF e número de nós dessa safra (0,011 m dia⁻¹; 0,046 m² m⁻² dia⁻² e 0,011 nós dia⁻¹, respectivamente) quando comparada aos valores obtidos na safra 2014/15 (0,006 m dia⁻¹; 0,019 m² m⁻² dia⁻² e 0,007 nós dia⁻¹, respectivamente). Muraro et al. (2009) afirmam que a disponibilidade hídrica influencia no acúmulo de sacarose da cana-de-açúcar, sendo que o excedente hídrico é desfavorável para esse acúmulo, pois atua como fator diluente da sacarose presente nos colmos, prejudicando o acúmulo de sacarose uma vez que estimula o crescimento e desenvolvimento vegetal.

3.3.3 Comportamento do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar

O crescimento em altura da cana-de-açúcar apresentou comportamento sigmoide em função dos DAC e, também, em função das variáveis climatológicas: graus-dia acumulado, evapotranspiração de referência acumulada e déficit hídrico acumulado

(Figura 3.8). Este comportamento também foi observado por outros autores (Machado et al., 1982; Atique-Ur-Rehman et al., 2013).

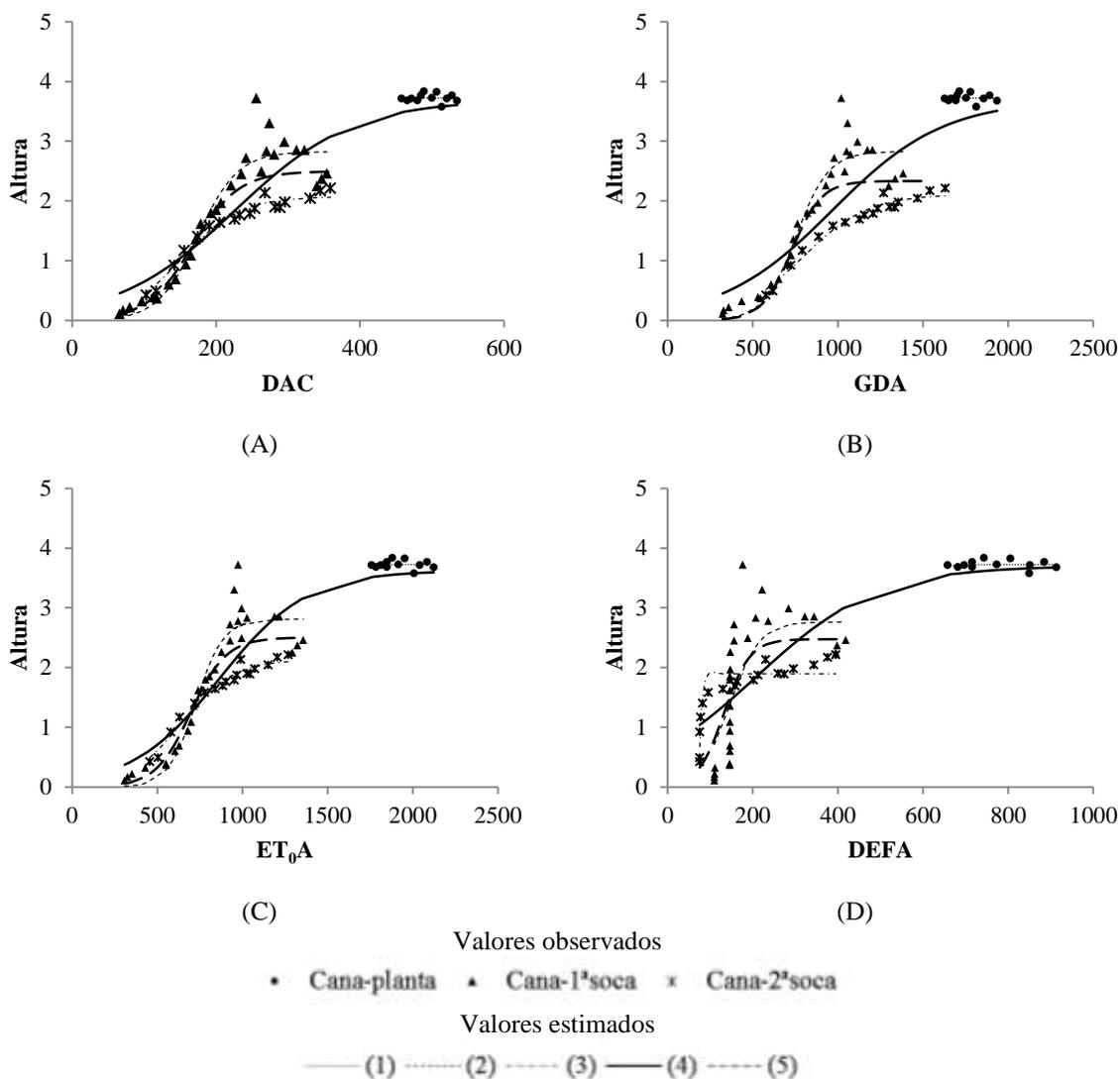


Figura 3.8. Alturas, m, observadas nas safras da cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16) e estimadas para cana-planta (1), cana-1^asoca (2), cana-2^asoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5) em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulados, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET₀A) (C) e déficit hídrico acumulados, mm (DEFA) (D), em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

Observou-se que o crescimento em altura foi similar ao longo dos ciclos de cana-soca 1^a e 2^a, em que, em média, cerca de 22% da altura foi alcançada até aos 150 DAC (período que compreende as fases de brotação e perfilhamento), para uma taxa média

de 0,009 m dia⁻¹, iniciando-se, então, uma fase de crescimento rápido (fase de crescimento), que se estendeu até aos 280 DAC, com taxa média de 0,014 m dia⁻¹, responsável pelo acúmulo de 59% da altura. Posteriormente, e até o momento do corte (fase de maturação), o crescimento representou, em média, 19% da altura máxima observada e taxa de 0,007 m dia⁻¹ (Figura 3.8 A).

Segundo Machado et al. (1982) o crescimento e acúmulo de fitomassa seca da parte aérea da cana-de-açúcar pode ser dividido em três fases distintas: i) fase inicial, de crescimento lento (plantio até 200 dias após o plantio, DAP); ii) crescimento rápido, com acúmulo de 75% da fitomassa seca total (200 a 400 DAP); iii) fase final, também lento (>400 DAP), corresponde a 11% da fitomassa seca da parte aérea acumulada. Estes resultados corroboram com os observados no município de Santo Antônio de Goiás.

O início da fase de rápido crescimento vegetativo (150 DAC), para os ciclos de cana-soca, ocorreu a partir de 749,26 GDA e 656,34 mm de ET₀ acumulada, sendo observada diminuição na taxa de altura da cultura para uma lâmina de déficit hídrico acumulado de 159 mm e 1189,73 GDA, aos 280 DAC. Nesse momento, a ET₀ acumulada foi de 1000,64 mm (Figura 3.8 B, C e D).

Valores semelhantes de graus-dia acumulado foram observados por Almeida et al. (2008) para as variedades SP79-1011, RB92579, RB93509 e RB931530. Para a cana-planta e cana-soca, respectivamente, a 1ª fase (estabelecimento da cultura) apresentou 750 e 600 GDA, na 2ª fase (crescimento rápido) ocorreram até 1500 e 950 GDA e a fase final acumulou 2015 e 1800 GDA.

As equações para a estimativa da altura da cana-de-açúcar em função dos DAC, GDA, ET₀A e DEFA apresentaram melhores resultados quando ajustadas aos dados por safra (i.e., cana-1ªsoca e cana-2ªsoca) – exceto para cana-planta, em que os dados utilizados foram referentes apenas à fase de maturação – visto que para essas equações o coeficiente de determinação observado foi, em média, igual a 0,93, além de apresentarem erros de estimativa 60% inferiores que os observados nas estimativas que consideraram mais de uma safra (Tabela 3.2).

Os ajustes de equações para altura de cana-soca em função dos DAC (Tabela 3.2 – equação A5) apresentou desempenho ótimo ($c > 0,85$) e boa precisão ($r = 0,91$), com valores dos erros EPE e EMA iguais a 0,37 e 0,26 m, respectivamente. O ajuste para as 3 safras estudadas (Tabela 3.2 – equação A4) também apresentou desempenho ótimo e

precisão satisfatória ($c = 0,92$; $r = 0,92$), porém observaram-se erros maiores (EPE = 0,44 m; EMA = 0,34 m).

Tabela 3.2. Parâmetros da equação sigmoidal (a , b , x_0), coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de estimativa, m (EPE), erro quadrático médio, m (EQM), raiz do erro quadrático médio, m (REQM), erro médio absoluto, m (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos valores estimados de altura, m, em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET₀A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), para cana-planta (1), cana-1^asoca (2), cana-2^asoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5).

	Parâmetros			R ²	EPE	EQM	REQM	EMA	d	r	c	
	a	b	x ₀									
(A)	(1)	3,72	10,11	407,30	0,01	0,07	0,23	0,07	0,05	0,88	0,10	0,09
	(2)	2,83	27,75	174,80	0,93	0,29	1,53	0,28	0,18	1,00	0,96	0,96
	(3)	2,07	40,00	152,40	0,97	0,09	0,39	0,09	0,08	1,00	0,98	0,98
	(4)	3,69	81,95	226,50	0,85	0,44	3,38	0,44	0,34	1,00	0,92	0,92
	(5)	2,50	31,97	167,30	0,84	0,37	2,51	0,37	0,26	1,00	0,91	0,91
(B)	(1)	3,72	26,42	149,50	0,01	0,07	0,23	0,07	0,05	0,87	0,00	0,00
	(2)	2,83	95,03	755,70	0,92	0,31	1,62	0,30	0,21	1,00	0,96	0,96
	(3)	2,11	192,10	793,40	0,97	0,10	0,40	0,09	0,08	1,00	0,98	0,98
	(4)	3,69	327,80	968,70	0,75	0,58	4,40	0,57	0,49	1,00	0,87	0,86
	(5)	2,33	86,80	729,80	0,77	0,43	2,94	0,43	0,32	1,00	0,88	0,88
(C)	(1)	3,72	35,58	158,10	0,01	0,07	0,23	0,07	0,05	0,87	0,00	0,00
	(2)	2,81	80,46	726,10	0,92	0,31	1,63	0,30	0,21	1,00	0,96	0,96
	(3)	2,13	153,20	640,20	0,97	0,09	0,39	0,09	0,08	1,00	0,98	0,98
	(4)	3,62	257,00	862,90	0,85	0,45	3,42	0,44	0,34	1,00	0,92	0,92
	(5)	2,50	103,90	696,90	0,82	0,39	2,63	0,38	0,29	1,00	0,91	0,90
(D)	(1)	3,72	25,79	525,90	0,01	0,07	0,23	0,07	0,05	0,87	0,09	0,08
	(2)	2,76	34,93	146,70	0,88	0,68	3,59	0,67	0,56	0,99	0,80	0,79
	(3)	1,90	3,36	77,73	0,86	0,20	0,85	0,20	0,17	1,00	0,92	0,92
	(4)	3,70	142,50	209,30	0,68	0,65	4,98	0,65	0,50	1,00	0,82	0,82
	(5)	2,48	30,38	132,70	0,51	0,64	4,31	0,63	0,53	1,00	0,72	0,72

Os valores estimados pelas equações, exceto para a equação específica de cana-planta, apresentaram de boa a ótima correlação com os valores estimados ($r > 0,75$) e, ainda, as equações apresentaram de boa a ótima confiança nas estimativas ($c > 0,75$).

Curvas polinomiais de segunda ordem foram ajustadas aos dados observados de IAF (Figura 3.9). O comportamento apresentado pelo IAF em função dos dias após o corte para cana-de-açúcar expostas às condições climáticas deste estudo também foi observado no município de Luiz Antônio – SP (Cabral et al., 2012), Paranavaí – PR (Oliveira et al., 2007) e em Faisalabad, no Paquistão (Atique-Ur-Rehman et al., 2013).

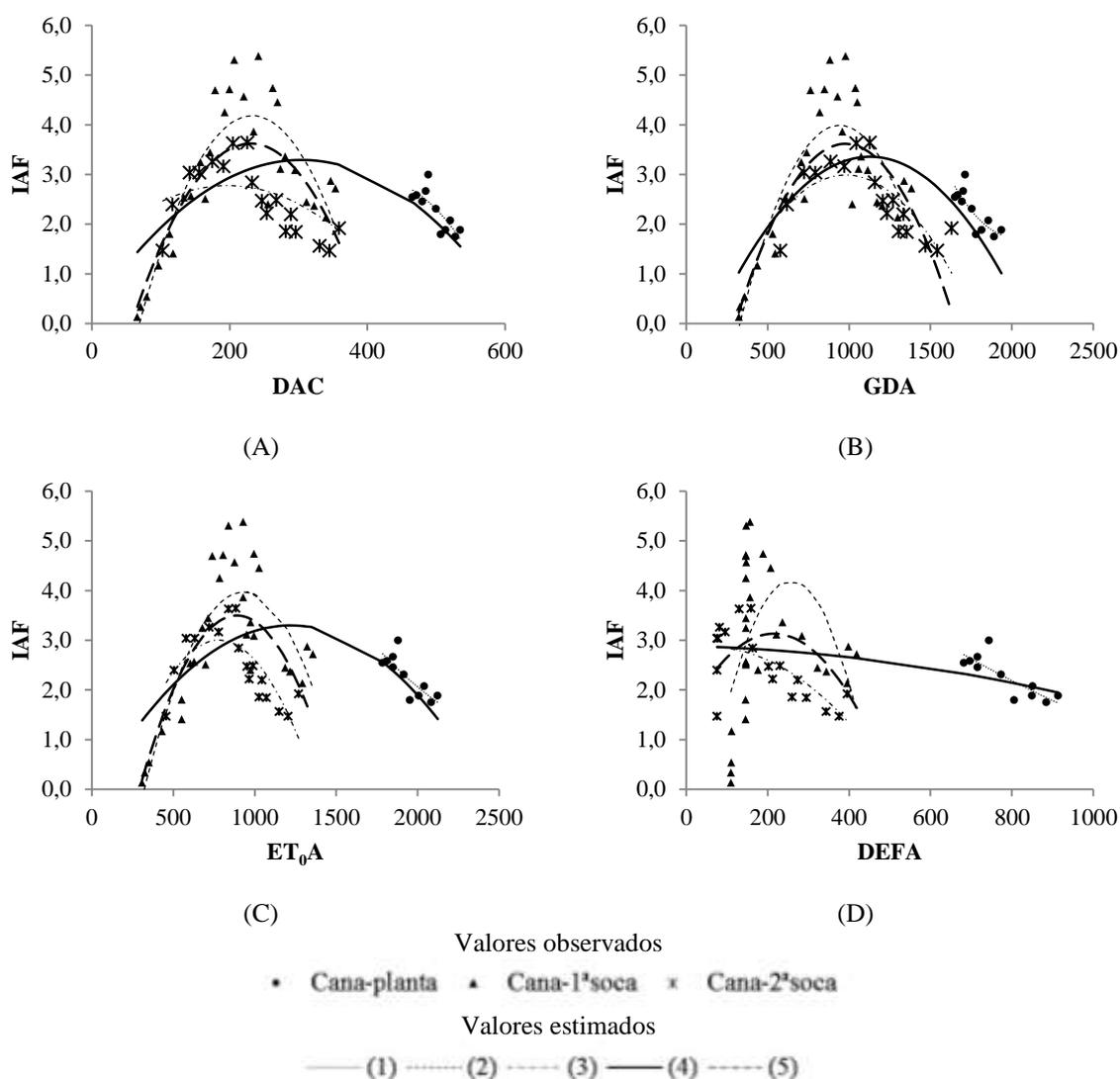


Figura 3.9. Índice de área foliar (IAF), $m^2 m^{-2}$ observados nas safras da cana-planta (2013/14), cana-1ªsoca (2014/15) e cana-2ªsoca (2015/16) e estimados para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5) em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET_0A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

O IAF apresentou valor máximo cerca de 234 DAC nas safras de cana-soca para o valor médio de graus-dia acumulado de 1052,94 °C. Observou-se, ainda, para esse mesmo período que a ET_0 acumulada foi igual a 906,90 mm. A partir da lâmina de déficit hídrico acumulado de 157,70 mm houve o início do decréscimo do IAF. Para as presentes condições de ambiente de cultivo, a cultura apresentou valores mais elevados de GDA para alcançar o IAF máximo quando comparado com resultados apresentados em outros estudos. Scarpari & Beauclair (2008), trabalhando com as variedades SP 80-3280 e RB 85-

5156 em cultivo de sequeiro, ciclo cana-planta, constataram que o IAF máximo das variedades, 6 m² m⁻² (SP 80-3280) e 4 m² m⁻² (RB 85-5156), ocorreu próximo aos 700 GDA em ambas as variedades. Para a variedade CB 47-355, tanto em sistema de irrigação quanto de sequeiro, Teruel et al. (1997) observaram que nos ciclos cana-planta e 1^a e 2^a socas o IAF máximo ocorre entre 650 e 900 °C acumulados, com IAF máximo próximo de 7 m² m⁻² no ciclo de cana-planta e entre 4 e 4,5 m² m⁻² nos ciclos de socas. Ainda segundo esses autores, a diferença entre os valores de IAF é devido às variações de perfilhamento entre as variedades e ciclos de safra (planta e soca) e características químicas e de compactação do solo.

Os parâmetros das equações de ajuste do IAF são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Parâmetros da equação polinomial de segunda ordem (a, b, y₀), coeficiente de determinação (R²), erro padrão de estimativa, m² m⁻² (EPE), erro quadrático médio, m² m⁻² (EQM), raiz do erro quadrático médio, m² m⁻² (REQM), erro médio absoluto, m² m⁻² (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos valores estimados do índice de área foliar, m² m⁻², em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET₀A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), para cana-planta (1), cana-1^asoca (2), cana-2^asoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5).

	Parâmetros			R ²	EPE	EQM	REQM	EMA	d	r	c	
	x ₀	a	b									
(A)	(1)	-12,47	7,33E-02	-8,74E-05	0,64	0,25	0,79	0,24	0,18	0,99	0,80	0,79
	(2)	-4,25	7,24E-02	-1,55E-04	0,77	0,69	3,66	0,68	0,56	1,00	0,88	0,87
	(3)	1,43	1,37E-02	-3,47E-05	0,12	0,54	2,24	0,53	0,45	0,98	0,76	0,74
	(4)	0,27	1,99E-02	-3,27E-05	0,27	0,98	7,36	0,97	0,77	0,99	0,52	0,51
	(5)	-2,83	5,60E-02	-1,21E-04	0,50	0,80	5,39	0,79	0,61	1,00	0,77	0,76
(B)	(1)	32,72	-3,07E-02	7,63E-06	0,65	0,25	0,78	0,23	0,18	0,99	0,81	0,80
	(2)	-5,46	2,01E-02	-1,06E-05	0,72	0,76	4,01	0,74	0,63	1,00	0,85	0,85
	(3)	-1,52	9,19E-03	-4,68E-06	0,56	0,47	1,95	0,46	0,37	0,99	0,75	0,74
	(4)	-1,22	8,12E-03	-3,60E-06	0,39	0,89	6,68	0,88	0,70	0,99	0,63	0,62
	(5)	-3,96	1,55E-02	-7,94E-06	0,62	0,75	5,11	0,75	0,58	1,00	0,79	0,79
(C)	(1)	14,71	-9,92E-03	1,80E-06	0,63	0,25	0,79	0,24	0,18	0,99	0,80	0,79
	(2)	-5,29	1,99E-02	-1,07E-05	0,71	0,77	4,10	0,76	0,65	1,00	0,84	0,84
	(3)	-1,98	1,28E-02	-8,21E-06	0,58	0,46	1,90	0,45	0,37	0,99	0,76	0,75
	(4)	-0,13	5,62E-03	-2,30E-06	0,26	0,98	7,41	0,97	0,77	0,99	0,51	0,50
	(5)	-4,24	1,74E-02	-9,77E-06	0,51	0,87	5,87	0,86	0,67	0,99	0,71	0,71
(D)	(1)	6,78	-7,27E-03	1,92E-06	0,68	0,24	0,75	0,23	0,17	0,99	0,82	0,81
	(2)	-2,56	5,24E-02	-1,02E-04	0,23	1,26	6,69	1,24	1,10	0,98	0,48	0,47
	(3)	2,81	1,59E-03	-1,32E-05	0,44	0,53	2,19	0,52	0,39	0,98	0,67	0,66
	(4)	2,89	-2,18E-04	-8,87E-07	0,05	1,11	8,36	1,10	0,81	0,98	0,23	0,23
	(5)	1,46	1,55E-02	-3,61E-05	0,09	1,18	7,97	1,16	0,94	0,98	0,30	0,29

As equações de ajuste do IAF (Tabela 3.3) apresentaram desempenho muito bom quando em função dos DAC ($c = 0,76$; $r = 0,77$; $EPE = 0,80 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$; $EMA = 0,61 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) e dos GDA ($c = 0,79$; $r = 0,79$; $EPE = 0,75 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$; $EMA = 0,58 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). Já quando ajustado em função da ET_0A o desempenho foi considerado bom ($c = 0,71$; $r = 0,71$; $EPE = 0,87 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$; $EMA = 0,67 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), e para DEFA péssimo ($c = 0,29$; $r = 0,30$; $EPE = 1,18 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$; $EMA = 0,94 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$).

Apesar de as equações de determinação do IAF para o ciclo cana-1^asoca terem apresentado desempenho ótimo quando em função do DAC, GDA e ET_0A (Tabela 3.3), observou-se que tais equações tendem a subestimar o valor de IAF máximo (Figura 3.9).

Oliveira et al. (2007) ajustaram curvas polinomiais de segunda ordem a dados de IAF em função dos dias após o plantio para três variedades de cana-de-açúcar (RB72454, RB855113 e RB855536), ciclo de cana-planta. As equações apresentaram coeficiente de determinação igual a 0,90 (RB72454), 0,83 (RB855113) e 0,82 (RB855536). Teruel et al. (1997) ajustaram aos dados de IAF em função dos graus-dia acumulados ao longo do ciclo da cana-de-açúcar modelos exponenciais e obtiveram resultados satisfatórios tanto para o ciclo de cana-planta ($R^2 = 0,58$) quanto para os ciclos de cana-1^asoca ($R^2 = 0,88$) e 2^asoca ($R^2 = 0,80$).

Para a FMS (Figura 3.10) a equação sigmoidal foi ajustada aos dados apresentando R^2 médio igual a 0,67 (Tabela 3.4). Silva et al. (2012) e Atique-Ur-Rehman et al. (2013) ajustaram modelos sigmoidais para estimar a FMS da cana-de-açúcar em função dos dias ao longo do ciclo da cultura. Contudo, Oliveira et al. (2007) descreveram para a massa seca total da parte aérea da cana-de-açúcar comportamento quadrático ao longo da safra, visto que neste estudo as taxas de acúmulo de massa seca dos colmos foram superiores na fase final do ciclo, em comparação as taxas da fase inicial, o que refletiu no comportamento da FMS.

Silva et al. (2012) realizaram a coleta de dados no município de Juazeiro, Bahia, Brasil, variedade RB 92-579, ciclo de cana-soca, e Atique-Ur-Rehman et al. (2013) realizaram os estudos com a variedade HSF-240, ciclo cana-planta, no município de Faisalabad, Punjab, Paquistão. Ambas as pesquisas apresentaram, para a fitomassa seca da parte aérea em função dos dias após o plantio/corte (DAC), ponto de inflexão em torno de 150 DAC, indicando que neste momento as taxas da FMS deixam de ser crescente e assumem comportamento decrescente.

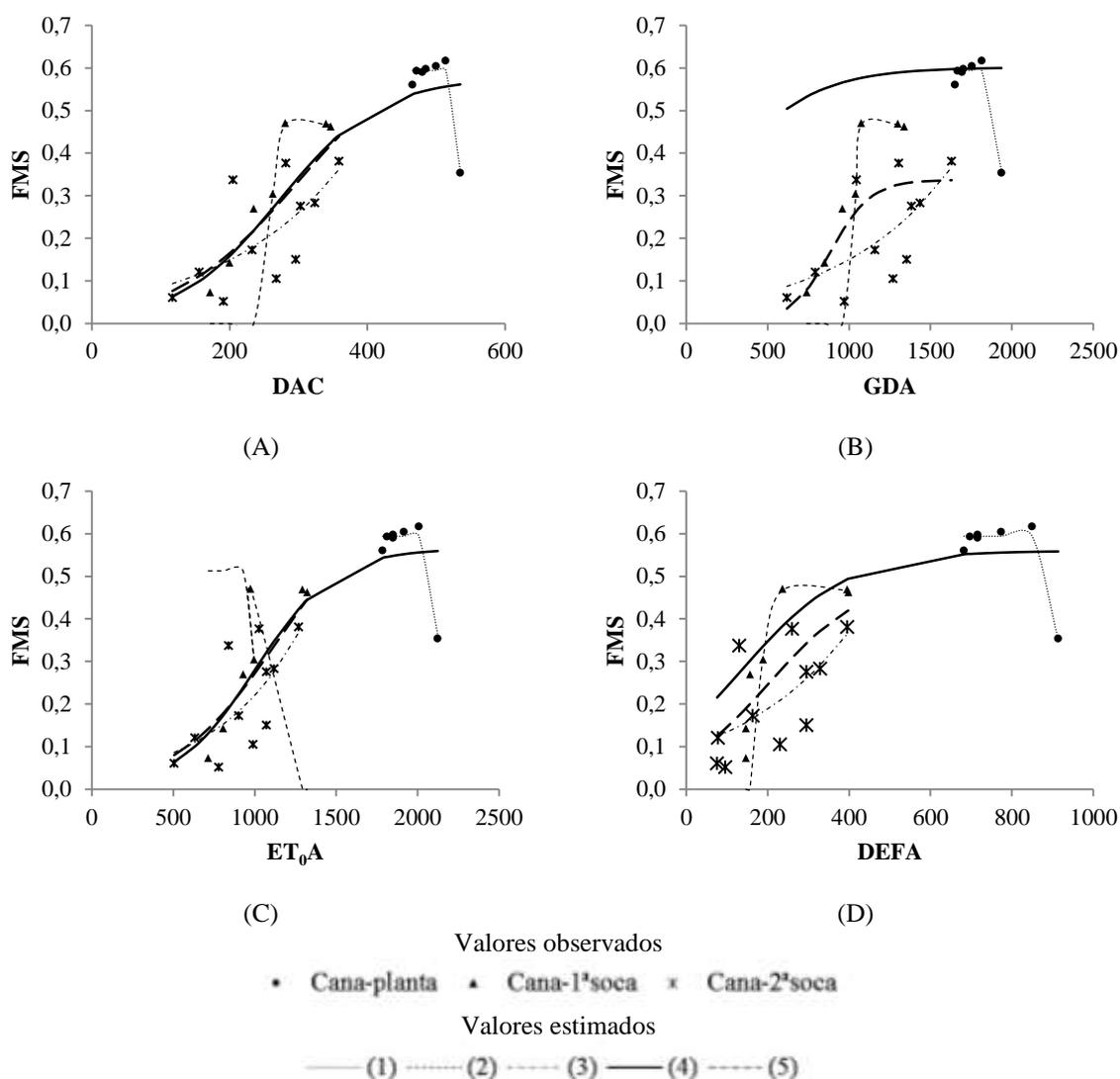


Figura 3.10. Fitomassa seca total da parte aérea (FMS), kg observadas nas safras da cana-planta (2013/14), cana-1ªsoca (2014/15) e cana-2ªsoca (2015/16) e estimadas para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5) em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET_0A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

As equações para cálculo da FMS em função dos DAC e da ET_0A desenvolvidas com os dados observados das três safras (Tabela 3.4) apresentaram desempenho ótimo ($c > 0,85$) e valores do EPE de 0,10 e 0,09 kg e EMA iguais a 0,08 e 0,07 kg, respectivamente. Os valores médios de EQM e REQM foram de 0,47 e 0,09 kg, respectivamente.

Para o ciclo da cana-planta, Oliveira et al. (2007) ajustaram para os dados de FMS curvas polinomiais de segunda ordem para as variedades de cana-de-açúcar

RB72454, RB855113 e RB855536, obtendo coeficientes de determinação iguais a 0,97; 0,96 e 0,95, respectivamente.

Silva et al. (2012) analisaram a RB92-579 da cana-de-açúcar, ciclo de soca em sistema irrigado, e ajustaram aos valores de fitomassa seca da parte aérea um modelo sigmoidal obtendo $R^2=0,99$.

Tabela 3.4. Parâmetros da equação sigmoidal (a, b, x_0), coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de estimativa, kg (EPE), erro quadrático médio, kg (EQM), raiz do erro quadrático médio, kg (REQM), erro médio absoluto, kg (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos valores estimados da massa seca total, kg, em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET_0A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5).

	Parâmetros			R^2	EPE	EQM	REQM	EMA	d	r	c	
	a	b	x_0									
(A)	(1)	0,59	-0,97	535,40	0,96	0,02	0,04	0,02	0,01	1,00	0,98	0,98
	(2)	0,47	0,78	262,50	1,00	0,13	0,31	0,12	0,07	0,98	0,93	0,91
	(3)	98,26	178,60	1359,00	0,39	0,09	0,30	0,09	0,07	0,98	0,66	0,64
	(4)	0,58	73,75	271,70	0,71	0,10	0,47	0,09	0,08	1,00	0,87	0,86
	(5)	0,66	89,02	297,80	0,53	0,10	0,41	0,10	0,08	0,99	0,74	0,73
(B)	(1)	0,59	-5,37	1938,00	0,96	0,02	0,04	0,02	0,01	1,00	0,98	0,98
	(2)	0,47	1,60	1039,00	1,00	0,13	0,31	0,12	0,07	0,98	0,93	0,91
	(3)	76,12	703,50	5380,00	0,40	0,09	0,29	0,09	0,07	0,98	0,67	0,65
	(4)	0,60	303,40	119,00	0,54	0,29	1,49	0,28	0,22	0,98	0,69	0,68
	(5)	0,34	124,20	886,00	0,31	0,11	0,47	0,11	0,09	0,98	0,62	0,61
(C)	(1)	0,59	-5,29	2126,00	0,96	0,02	0,04	0,02	0,01	1,00	0,98	0,98
	(2)	0,51	-10,50	999,74	0,43	0,37	0,91	0,34	0,28	0,85	-0,69	-0,59
	(3)	48,30	526,00	3831,00	0,41	0,09	0,29	0,09	0,07	0,98	0,67	0,66
	(4)	0,56	242,90	1004,00	0,71	0,09	0,46	0,09	0,06	1,00	0,87	0,87
	(5)	0,68	308,20	1125,00	0,53	0,10	0,40	0,09	0,07	0,99	0,75	0,74
(D)	(1)	0,59	-2,64	914,70	0,96	0,02	0,04	0,02	0,01	1,00	0,98	0,98
	(2)	0,47	2,33	187,00	1,00	0,13	0,31	0,12	0,07	0,98	0,93	0,91
	(3)	43,96	294,00	1802,00	0,37	0,10	0,30	0,09	0,07	0,98	0,64	0,63
	(4)	0,56	129,40	136,40	0,70	0,13	0,67	0,13	0,10	0,99	0,84	0,83
	(5)	0,50	117,50	204,40	0,49	0,11	0,44	0,10	0,09	0,99	0,69	0,68

O número de nós apresentou melhores estimativas quando determinadas por meio de equação sigmoidal (Figura 3.11), visto que o número de nós, assim como a altura da planta, também apresentou três fases distintas ao longo das safras. Observou-se, inicialmente, uma fase de crescimento mais lento, com taxa média de aumento do número de nós igual a $0,009$ nós dia^{-1} , que durou até cerca de 150 DAC, em que se obteve 749,26

°C dia acumulado para lâminas de ET_0A e $DEFA$ de 656,34 e 112,07 mm, respectivamente.

Posteriormente, ocorreu aumento acentuado do número de nós ($0,136$ nós dia^{-1}) entre 150 e 280 DAC. Esta fase encerrou-se com GDA médio de $1189,73$ °C dia, apresentado ET_0A igual a $1000,64$ mm e $248,22$ mm de déficit hídrico acumulado. Passado este período, a taxa média de número de nós diminuiu para $0,017$ nós dia^{-1} .

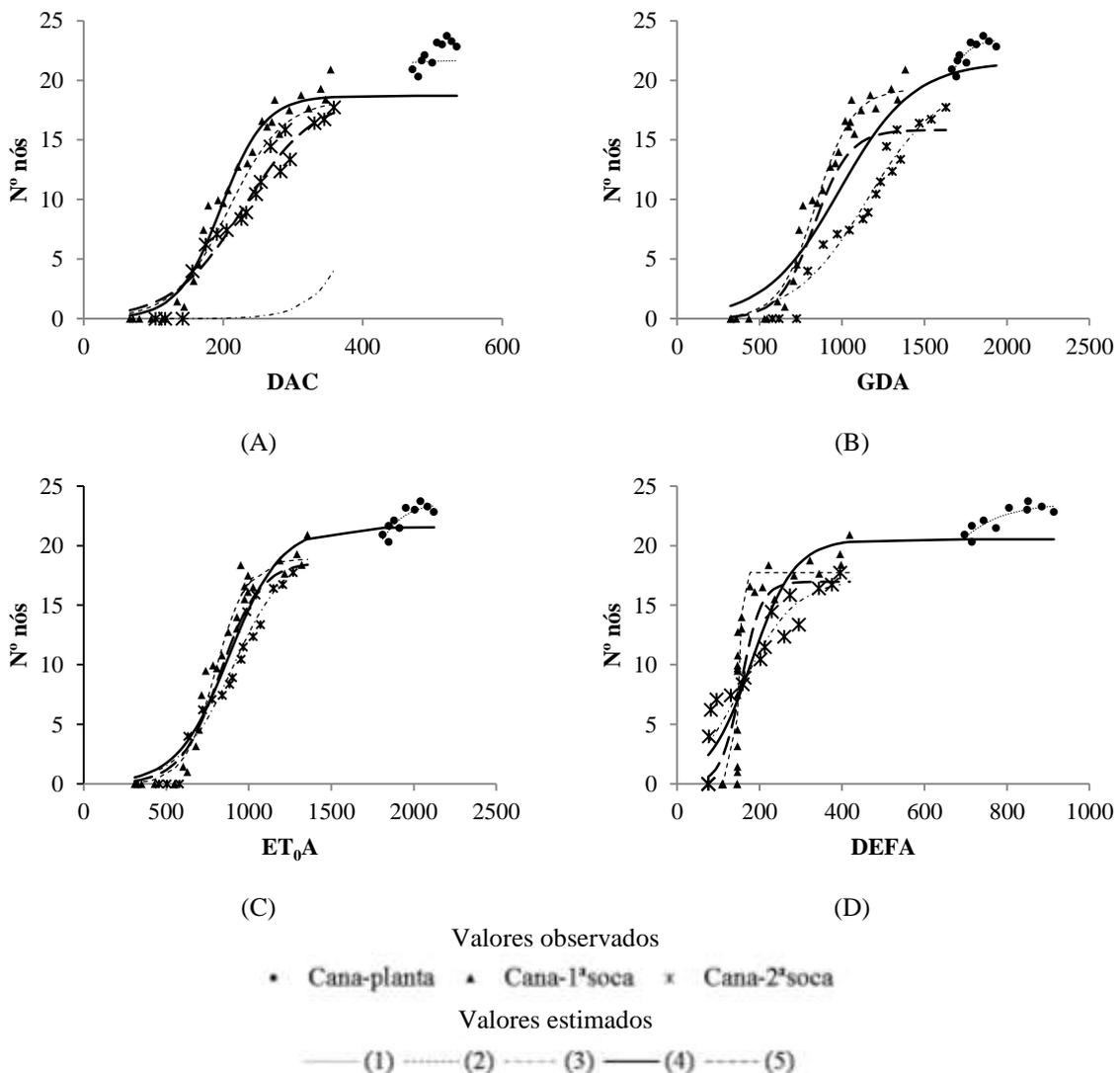


Figura 3.11. Número de nós observados nas safras da cana-planta (2013/14), cana-1ªsoca (2014/15) e cana-2ªsoca (2015/16) e estimados para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5) em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET_0A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm ($DEFA$) (D), em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

Em geral, as equações de determinação do número de nós apresentaram desempenho ótimo de estimativa ($c > 0,85$) além de boa precisão (r médio igual a 0,92). As equações desenvolvidas com os valores observados nas três safras estudadas e nas safras de ciclo de cana-soca apresentaram em média $EPE = 2,77$ e $2,68$ nós, $EQM = 20,69$ e $18,17$ nós, $REQM = 2,74$ e $2,65$ nós e $EMA = 2,29$ e $2,16$ nós, respectivamente (Tabela 3.5).

Tabela 3.5. Parâmetros da equação sigmoidal (a , b , x_0), coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de estimativa, nº nós (EPE), erro quadrático médio, nº nós (EQM), raiz do erro quadrático médio, nº nós (REQM), erro médio absoluto, nº nós (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos valores estimados do número de nós em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulado, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET_0A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5).

	Parâmetros			R^2	EPE	EQM	REQM	EMA	d	r	c	
	a	b	x_0									
(A)	(1)	21,71	52,58	229,50	0,94	1,28	3,84	1,21	1,04	0,94	0,87	0,82
	(2)	18,38	39,01	207,80	0,93	1,67	8,85	1,64	1,40	1,00	0,99	0,99
	(3)	23,99	33,79	412,40	0,75	10,44	43,05	10,15	8,87	0,97	0,68	0,66
	(4)	18,70	31,24	197,10	0,98	2,54	18,98	2,51	1,91	1,00	0,95	0,95
	(5)	18,59	50,37	229,00	0,95	2,43	16,47	2,40	1,96	1,00	0,96	0,96
(B)	(1)	23,51	89,67	1493,00	0,74	0,58	1,73	0,55	0,47	0,99	0,86	0,85
	(2)	19,28	112,60	843,20	0,98	1,16	6,14	1,14	0,90	1,00	0,99	0,99
	(3)	19,96	220,90	1153,00	0,95	1,22	5,05	1,19	1,00	1,00	0,98	0,98
	(4)	21,54	224,10	985,00	0,84	3,15	23,58	3,12	2,78	1,00	0,92	0,91
	(5)	15,84	106,90	832,80	0,80	2,99	20,29	2,96	2,37	1,00	0,90	0,90
(C)	(1)	23,61	119,70	1585,00	0,75	0,57	1,71	0,54	0,46	0,99	0,86	0,86
	(2)	18,90	95,02	797,90	0,97	1,23	6,49	1,21	0,95	1,00	0,99	0,99
	(3)	19,70	163,50	904,90	0,95	1,21	4,97	1,17	0,99	1,00	0,98	0,98
	(4)	21,54	157,00	880,90	0,94	1,91	14,30	1,89	1,60	1,00	0,97	0,97
	(5)	18,63	121,10	826,90	0,92	1,87	12,67	1,85	1,49	1,00	0,96	0,96
(D)	(1)	23,56	83,75	533,40	0,76	0,55	1,66	0,53	0,45	0,99	0,87	0,86
	(2)	17,73	4,64	149,90	0,84	2,97	15,73	2,92	2,18	1,00	0,92	0,92
	(3)	17,14	62,94	162,20	0,91	1,86	7,66	1,80	1,41	1,00	0,95	0,95
	(4)	20,53	52,36	180,90	0,80	3,46	25,91	3,43	2,87	1,00	0,90	0,89
	(5)	16,97	24,27	155,60	0,74	3,42	23,23	3,39	2,83	1,00	0,87	0,86

Para os teores de sacarose foram ajustadas curvas polinomiais de segunda ordem para os seus valores observados em função dos DAC, GDA, ET_0A e DEFA (Figura 3.12). Apesar de descrever uma função quadrática, não foi observada a ocorrência de acúmulo máximo de sólidos solúveis com posterior queda, o que indica que quando foram

obtidas condições climáticas favoráveis para a maturação da cana-de-açúcar – no caso de Santo Antônio de Goiás, ocorrência de déficit hídrico – tais condições foram mantidas até o momento do corte, o que favoreceu o acúmulo de sacarose nas células dos colmos.

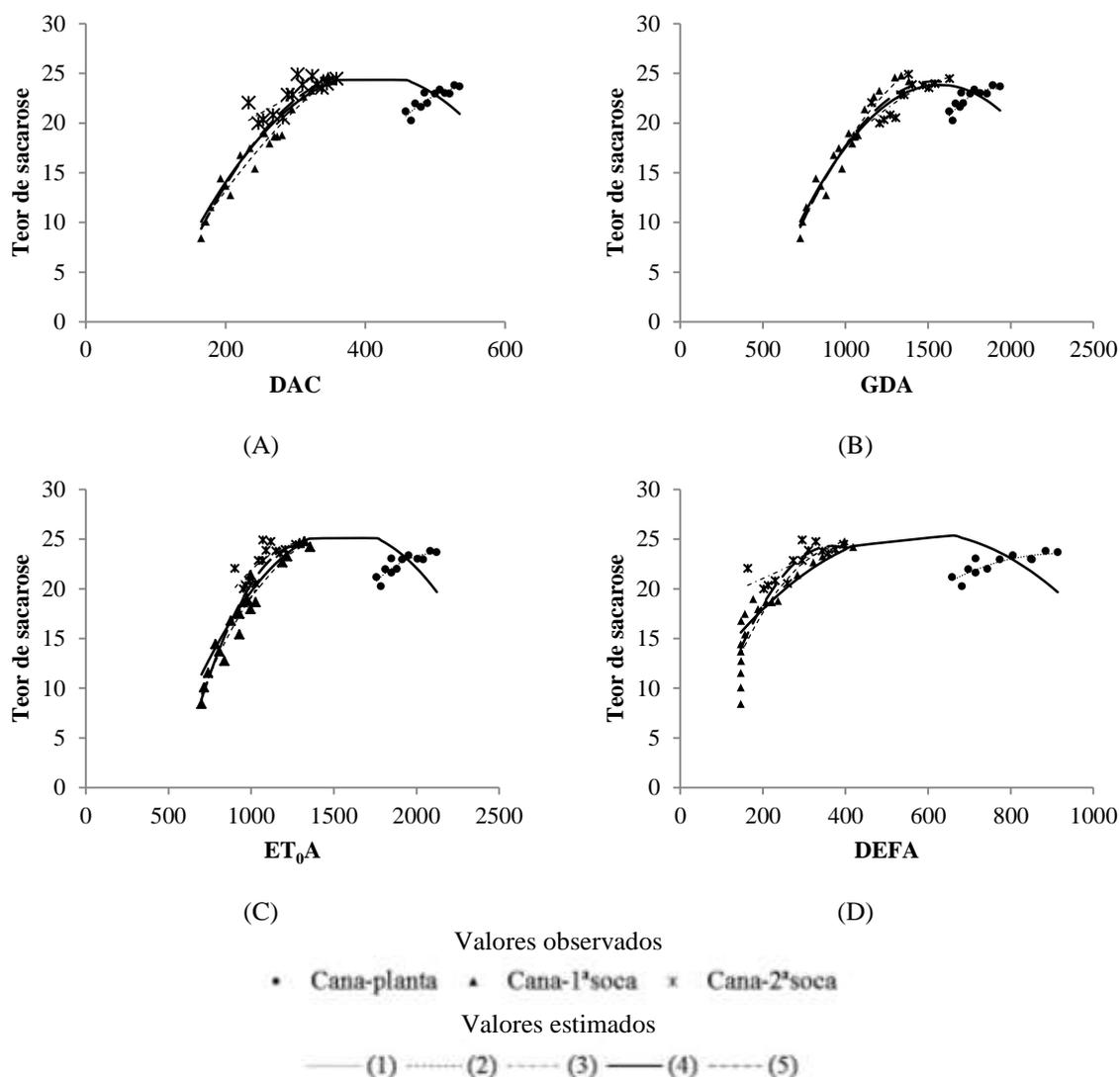


Figura 3.12. Teor de sólidos solúveis, °Brix, observados nas safras da cana-planta (2013/14), cana-1ªsoca (2014/15) e cana-2ªsoca (2015/16) e estimados para cana-planta (1), cana-1ªsoca (2), cana-2ªsoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5) em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulados, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET_0A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

Vieira et al. (2013), estudando os indicadores de desenvolvimento, maturação e produção da cana-de-açúcar em função da época de interrupção da irrigação, obtiveram que o índice de maturação da cana-de-açúcar (relação do teor de sólidos solúveis da base e

ponta do colmo) apresentou comportamento semelhante aos resultados encontrados neste trabalho, ou seja, tendência de comportamento quadrático da variável.

Os ajustes dos valores do teor de sólidos solúveis nos ciclos da cana-planta e cana-soca em função dos DAC, GDA e ET₀A apresentaram ótimo desempenho ($c > 0,85$) e em função do DEFA com desempenho muito bom ($c = 0,78$), além de apresentarem precisão satisfatória (em média, $r = 0,88$). O referido modelo apresenta EPE e EMA médios de 1,92 e 1,47 °Brix, respectivamente (Tabela 3.6).

Tabela 3.6. Parâmetros da equação polinomial de segunda ordem (a, b, y_0), coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de estimativa, °Brix (EPE), erro quadrático médio, °Brix (EQM), raiz do erro quadrático médio, °Brix (REQM), erro médio absoluto, °Brix (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos valores estimados dos teores de sacarose, °Brix, em função dos dias após o plantio/corte (DAC) (A), graus-dia acumulados, °C dia (GDA) (B), evapotranspiração potencial de uma cultura de referência acumulada, mm (ET₀A) (C) e déficit hídrico acumulado, mm (DEFA) (D), para cana-planta (1), cana-1^asoca (2), cana-2^asoca (3), 3 safras (4) e 2 safras – socas (5).

	Parâmetros			R^2	EPE	EQM	REQM	EMA	d	r	c	
	x_0	a	b									
(A)	(1)	-82,58	0,39	-3,51E-04	0,79	0,50	1,66	0,48	0,40	0,99	0,89	0,88
	(2)	-10,49	0,14	-1,22E-04	0,96	0,99	4,30	0,96	0,84	1,00	0,98	0,98
	(3)	7,18	0,07	-5,79E-05	0,63	1,04	3,77	1,01	0,82	0,99	0,80	0,79
	(4)	-16,91	0,20	-2,51E-04	0,84	1,67	11,18	1,65	1,25	1,00	0,92	0,91
	(5)	-21,02	0,23	-2,93E-04	0,90	1,45	8,34	1,43	1,04	1,00	0,95	0,95
(B)	(1)	-108,80	0,14	-3,66E-05	0,77	0,53	1,76	0,51	0,44	0,99	0,87	0,87
	(2)	-24,89	0,06	-1,68E-05	0,96	1,00	4,37	0,98	0,85	1,00	0,98	0,98
	(3)	-11,26	0,04	-1,10E-05	0,62	1,05	3,64	1,01	0,80	0,99	0,78	0,77
	(4)	-23,87	0,06	-1,94E-05	0,88	1,41	9,36	1,39	1,12	1,00	0,94	0,94
	(5)	-27,80	0,07	-2,17E-05	0,93	1,19	6,71	1,17	0,98	1,00	0,97	0,97
(C)	(1)	-76,18	0,09	-2,24E-05	0,76	0,54	1,78	0,51	0,44	0,99	0,87	0,86
	(2)	-31,93	0,08	-2,65E-05	0,95	1,06	4,63	1,04	0,79	1,00	0,98	0,98
	(3)	-15,23	0,06	-2,11E-05	0,58	1,12	4,03	1,08	0,86	0,99	0,76	0,75
	(4)	-21,69	0,06	-1,95E-05	0,76	2,05	13,78	2,03	1,58	1,00	0,87	0,87
	(5)	-47,48	0,11	-4,20E-05	0,90	1,49	8,56	1,47	1,07	1,00	0,95	0,95
(D)	(1)	-10,46	0,07	-4,06E-05	0,73	0,56	1,86	0,54	0,44	0,99	0,86	0,85
	(2)	-3,14	0,14	-1,76E-04	0,83	2,03	8,83	1,97	1,45	1,00	0,91	0,91
	(3)	17,38	0,02	2,94E-06	0,60	1,09	3,92	1,05	0,86	0,99	0,78	0,77
	(4)	7,61	0,06	-5,39E-05	0,62	2,56	17,15	2,53	1,92	1,00	0,79	0,78
	(5)	-4,17	0,15	-2,10E-04	0,80	2,04	11,73	2,01	1,39	1,00	0,90	0,89

Para a determinação dos teores de sacarose para ciclos de cana-soca, pode-se, ainda, utilizar a equação específica da qual apresenta, além de ótimo desempenho e boa

precisão, erros médios menores, tendo EPE = 1,54 °Brix e EMA = 1,12 °Brix (Tabela 3.6, Parâmetros 5).

Não foram encontrados na literatura científica modelos matemáticos específicos para determinação do acúmulo de sacarose (°Brix) para cana-de-açúcar, mas sim modelos empíricos de regressão linear multivariada para estimativa de açúcar total recuperável (ATR).

Scarpari & Beauclair (2004) elaboraram um modelo para determinação de ATR para a cultura da cana-de-açúcar tendo como variáveis independentes dados referentes aos fatores de produção como armazenamento de água no solo e graus-dias negativos. O modelo de maturação para cana de ano não apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) entre os valores observados e os estimados, sendo significativo para o município de Puntal SP.

Scarpari & Beauclair (2009) também desenvolveram modelos empíricos de estimativa de ATR, para diferentes variedades de cana-de-açúcar (RB72454, SP81-3250 e SP80-1842) para as condições climáticas do município de Piracicaba – SP. O modelo desenvolvido com os dados observados da variedade RB72454 apresentou $R^2=0,2613$ e $REQM=11,11$; para as variedades SP81-3250 seu modelo teve R^2 e $REQM$, respectivos, iguais a 0,33 e 8,53 e para SP80-1842 $R^2=0,48$ e $REQM=8,88$. De acordo com os autores, todos os modelos avaliaram o ATR de forma aceitável para as condições estudadas.

Cardozo et al. (2015) propuseram modelos empíricos para estimar o conteúdo de açúcar total recuperável (ATR) sob condições climáticas distintas no estado de São Paulo e a avaliação desses modelos indicou resultados satisfatórios, com coeficientes de determinação para variedades de ciclos precoce, médio e tardio de 0,92 ($p < 0,01$), 0,95 ($p < 0,01$) e 0,94 ($p < 0,01$), respectivamente.

3.4 CONCLUSÃO

O crescimento e o teor de sólidos solúveis da cana-de-açúcar são prejudicados quando a lâmina de água no solo se encontra abaixo da lâmina crítica de água no solo para a cultura. Para essas condições são observadas reduções das taxas das variáveis biométricas.

As menores temperaturas do ar específicas do centro-oeste goiano não são suficientes para induzir o processo de maturação da cana-de-açúcar.

O maior teor de sólidos solúveis no final da safra e as maiores taxas do acúmulo de sacarose são observados quando a lâmina de água no solo permanece próxima da capacidade de campo (sem a necessidade de excedentes hídricos) nas fases fenológicas de brotação, perfilhamento e crescimento vegetativo (até 250 DAC) e posterior redução da lâmina de água para valores abaixo da umidade crítica.

Lâmina de déficit hídrico acumulado a partir de 193 mm nos últimos 80 dias antes do corte provoca redução na taxa do acúmulo de sacarose.

Ao longo da safra a altura e o número de nós dos colmos apresentam comportamento sigmoidal enquanto o índice de área foliar e o teor de sólidos solúveis são melhores descritos por curvas polinomiais de segunda ordem; todas em função do tempo, de variáveis agroclimatológicas e do déficit hídrico.

O crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar podem ser estimados a partir dos graus-dia acumulados, evapotranspiração de referência acumulado e do déficit hídrico acumulado.

3.5 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 2006. 300p. **Irrigation and Drainage, Paper 56.**

ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORA, I.; BARBOSA, G.V.S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R.A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência Agrotecnológica**, Lavras, v.32, n.5, p.1441-1448, 2008.

ANDRÉ, R.G.B.; MENDONÇA, J.C.; MARQUE, V.S.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.25, n.3, p.375-382, 2010.

ARAÚJO, R.; ALVES JUNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A.W.P. Variação na qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar em decorrência da suspensão da irrigação antes da colheita e da ocorrência de baixas temperaturas. **Bragantia**, Campinas, v.75, n.1, p.118-127, 2016.

ATIQUE-UR-REHMAN, EHSANULLAH, AHMAD, R.; JABBAR, A. Interactive study of row spacings and foliar application of macro and micro-nutrients on growth, yield and quality of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Pakistan Journal of Botany**, Karachi, v. 45, n. 2, p. 427-433, 2013.

BARBOSA, A.M.; GUIDORIZI, K.A.; CATUCHI, T.A.; MARQUES, T.A.; RIBEIRO, R.V.; SOUZA, G.M. Biomass and bioenergy partitioning of sugarcane plants under water deficit. **Acta Physiologiae Plantarum**, Poznan, v.37, p.142-149, 2015.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: **Planalsucar**, Coordenadoria Regional Sul. COSUL. Araras. 1977. p.1-22.

BATTA, S.K.; KAUR, B.; SITAL, J.S.; SANDHU, S.K.; UPPAL, S.K. Sucrose accumulation and intermodal soluble invertase isoenzymes in plant and ratoon crops of sugarcane. **Sugar Tech**, Lucknow, v.13, n.1, p.51-59, 2011.

CABRAL, O.M.R.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H.; LIGO, M.A.V.; TATSCH, J.D.; FREITAS, H.C.; BRASILIO, E. Water use in a sugarcane plantation, **Global Change Biology Bioenergy**, Medford, v.4, p.555-565, 2012.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.70, n.6, p.449-456, 2013.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C.; PANOSSO, A.R.; PALHARES, A.L.; IDE, B.Y. Modeling sugarcane ripening as a function of accumulated rainfall in Southern Brazil. **International Journal of Biometeorology**, Lisse, v.59, n.12, p.1913–1925, 2015.

CINTRA, J.E.V.; FERREIRA, G.H.; BRASIL, R.P.C. Viabilidade da irrigação suplementar na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) em regiões com déficit hídrico. **Nucleus**, Ituverava, Edição Especial, 2008.

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

CTC. CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Revista variedades CTC**. 2013. Disponível em: <<http://www.ctcanavieira.com.br/downloads/variedades2013WEB3.pdf>> Acesso em 27 de março de 2017.

DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo. 2010. 882p.

ECCO, M.; SANTIAGO, E.F.; LIMA, P.R. Respostas biométricas em plantas jovens de cana-de-açúcar submetidas ao estresse hídrico e ao alumínio. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v.5, n.1, p.59-67, 2014.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. rev. ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azúcar**. Barcelona: Editorial Blume, 1975. 433p.

GONÇALVES, E.R.; FERREIRA, V.M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T.P.; DUARTE, W.G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.4, p.378–386, 2010.

HEMAPRABHA, G.; NAGARAJAN, R.; ALARMELU, S. Response of sugarcane genotypes to water deficit stress. **Sugar Tech**, Lucknow, v.6, n.3, p.165–168, 2004.

HERMANN, E. R.; CÂMARA; G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar da cana-de-açúcar. **Revista da STAB**, Piracicaba, v.17, p.32-34, 1999.

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.

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SPILLMAN, M.F.; HEWITT, M.L.; JACKSON, J. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural and Resource Economics**, Medford, v.59, p.13–26, 2008.

JADOSKI, C.J.; TOPPA, E.V.B.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, Guarapuava, v.3, n.2, p.169-176, 2010.

MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; FAHL, J.I.; ARRUDA, H.V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 9, p. 1323-1329, 1982.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em 10 out. 2016.

MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JÚNIOR, J. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: INMET, 2009. 530p. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/home/publicacoes/agrometeorologia_dos_cultivos.pdf>. Acesso em 21 ago. 2016.

MARIN, F.R.; JONES, J.W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.71, n.1, p.1-16, 2014.

MURARO G.B.; ROSSI JÚNIOR, P.; OLIVEIRA, V.C.; GRANSOTTO, P.M.C.; SCHOGOR, A.L.B. Efeito da idade de corte sobre a composição bromatológica e as características da silagem de cana-de-açúcar plantada em dois espaçamentos e três idades de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.38, n.8, p.1525-1531, 2009.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; BESPALHOK-FILHO, J.C. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.37, n.2, p.71-76, 2007.

PEREIRA, J.A.; AGOSTINHO, E.; ISLER, P.R. Método de graus-dias para estimar o desenvolvimento da cana-de-açúcar. In: Simpósio Interdisciplinar de Tecnologias na Educação, I, 2015, Boituva, **Anais...** Boituva, p.217-224, 2015.

ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.J.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.64, p.221-227, 1999.

RODRIGUES, J.A.R. Do engenho à biorrefinaria: a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. **Química Nova**, São Paulo, v.34, n.7, p.1242-1254, 2011.

SANTOS, C.M.; SILVA, M.A.; LIMA, G.P.P.; BORTOLHEIRO, F.P.A.P.; BRUNELLI, M.C.; HOLANDA, L.A.; OLIVER, R. Physiological changes associated with antioxidant enzymes in response to sugarcane tolerance to water deficit and rehydration. **Sugar Tech**, Lucknow, v.17, n.3, p.291-304, 2015.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Sugarcane maturity estimation through edaphicclimatic parameters. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, p. 486-491, 2004.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Variação espaço-temporal do índice de área foliar e do brix em cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.1, p.35-41, 2008.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, n.5, p.622-628, 2009.

SILVA, M.A.; SOARES, R.A.B.; LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.3, p.655-661, 2008.

SILVA, A.L.C.; COSTA, W.A.J.M. Varietal variation in growth, physiology and yield of sugarcane under two contrasting water regimes. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.12, n.2, p.1-12, 2009.

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; VIEIRA, V.J.S.; F. JÚNIOR, W.G. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.1, p.64-71, 2012.

SIMÕES, W.L.; CALGARO, M.; COELHO, D.S.; SOUZA, M.A.; LIMA, J.A. Respostas de variáveis fisiológicas e tecnológicas da cana-de-açúcar a diferentes sistemas de irrigação. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.46, n.1, p.11-20, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução: SANTARÉM, E.R. [et al.] 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.

TERUEL, D.A.; BARBIERI, V.; FERRARO JÚNIOR, L.A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.54, n.spe, p.39-44, 1997.

VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; DELAZARI, F.T. Época de interrupção da irrigação na cultura da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v.18, n.3, p.426-441, 2013.

VILLA NOVA, N.A.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; PEREIRA, A.R.; OMETTO, J.C. **Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máximas e mínimas**. São Paulo: USP, 1972. (Caderno de ciências da terra, n. 30).

WALDRON, J.C.; GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A. The physiology of sugarcane. IX. Factors affecting photosynthesis and sugar storage. **Australian Journal Biological Sciences**, Melbourne, v.20, p.1043-1052, 1967.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n.C5, p.8995-9005, 1985.

ZHAO, D.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J.C. Sugarcane leaf photosynthesis and growth characters during development of water-deficit stress. **Crop Science**, Madison, v.53, p.1066-1075, 2013.

4 MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E DO DÉFICIT HÍDRICO DO SOLO NO CENTRO-OESTE GOIANO

RESUMO

Em condições específicas, o ambiente de cultivo (clima e solo) estimula o acúmulo de açúcares no colmo da cana-de-açúcar, induzindo o processo de maturação da planta. Assim, a estimativa do grau de maturação da cana-de-açúcar pode ser realizada a partir do conhecimento do comportamento de resposta da cultura em função das condições do ambiente, contribuindo com a quantificação de matéria-prima e com o planejamento da colheita. O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos de variáveis meteorológicas e do déficit hídrico do solo no processo de maturação da cana-de-açúcar e gerar modelos de previsão do teor de sólidos solúveis ($^{\circ}$ Brix) e dos açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t^{-1}). O experimento foi realizado no município de Santo Antônio de Goiás, GO, em área arrendada da usina CentroÁlcool[®], em cultivo de cana-planta (2013/14), cana-1^asoca (2014/15) e cana-2^asoca (2015/16), da variedade CTC-4. Coletaram-se os dados do teor de sólidos solúveis ($^{\circ}$ BRIX) quinzenalmente, a partir de 165^o dia após o corte, utilizando-os para estimar o índice de maturação (IM). A obtenção dos açúcares totais recuperáveis (ATR) foi realizada em uma frequência mensal, a partir de quatro meses antes do corte. Os dados meteorológicos foram obtidos da estação meteorológica automática, sendo utilizados para a determinação das lâminas de água do solo, pelo cálculo do balanço hídrico sequencial semanal, da evapotranspiração de referência e dos graus-dia. Estas variáveis foram submetidas à análise estatística multivariada, a fim de selecionar variáveis para os modelos de estimativa. Estes modelos foram validados com dados experimentais independentes de outras variedades de cana-de-açúcar, sendo empregados para as condições de ambiente dos quais foram gerados. As variáveis independentes, em ambos os modelos de estimativa, foram os graus-dia acumulados, evapotranspiração de referência acumulada e lâmina de água atual no solo, das quais apresentaram coeficiente de determinação múltipla (R_p^2) maior que 0,60. As estimativas foram satisfatórias, apresentando erro médio absoluto (EMA) igual a 1,15 $^{\circ}$ Brix e 9,88 kg t^{-1} e confiança muito boa ($c > 0,75$). Nas estimativas independentes, a determinação do teor de sólidos solúveis apresentou EMA $< 2,60$ $^{\circ}$ Brix enquanto o ATR resultou em EMA $< 21,30$ kg t^{-1} , com confiança de boa a ótima ($c > 0,70$).

Palavras-chave: *Saccharum* spp., variáveis biométricas, graus brix, índice de maturação, condições climáticas do Cerrado.

ABSTRACT

MATURATION OF SUGARCANE IN FUNCTION OF METEOROLOGICAL VARIABLES AND SOIL WATER DEFICIT IN MIDWEST GOIANO

Under specific conditions, the growing environment (climate and soil) stimulates the accumulation of sugars in the sugarcane, inducing the process of maturation in the plant. Thus, the estimation of the degree in maturation of sugarcanes can be made from the response behavior of the crop in function of the environmental conditions contributing to the quantification of raw material and the planning of harvest. The objective of this research was to evaluate the effects of meteorological variables and soil water deficit on the sugarcane maturation process and to generate predictive models of soluble solids content ($^{\circ}$ BRIX) and total recoverable sugars (ATR, kg t^{-1}). The experiment was tested at the city of Santo Antonio of Goiás, GO, Brazil, in a leased plant of CentroAlcool[®], in cane plant cultivation (2013/14), cane -1st ratoon (2014/15) and cane-2nd ratoon (2015/16), in variety CTC-4. The data from the soluble solids content ($^{\circ}$ BRIX) was collected every fortnightly from 165^o day after the cut using them to estimate the maturation index (IM). The attainment of total recoverable sugars (ATR) was performed on a monthly basis from four months prior to the cut. The meteorological data was obtained from the automatic weather station to determine the soil water depths by calculating the weekly sequential water balance of the evapotranspiration and degree days. These variables were submitted to multivariate statistical analysis in order to select variables for the estimation models. These models were validated with independent experimental data from other varieties of sugarcane, being used for the environmental conditions from which they were generated. The independent variables, in both estimation models, were accumulated degree days, cumulative reference evapotranspiration and current water depth in the soil in which they showed multiple determination coefficient (R_p^2) greater than 0.60. The estimates were satisfactory, with absolute mean error (MAE) equal to 1.15 $^{\circ}$ BRIX and 9.88 kg t^{-1} and great confidence ($c > 0.75$). In the independent estimates, the determination of soluble solids MAE < 2.60 $^{\circ}$ BRIX while the TRS resulted in MAE < 21.30 kg t^{-1} , with confidence from good to great ($c > 0.70$).

Key words: *Saccharum* spp., biometric variables, degrees brix, maturation index, Brazilian Cerrado climate conditions.

4.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e sua produção destina-se principalmente à produção de etanol e açúcar (FAO, 2012; MAPA, 2016). A área colhida de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroenergética, safra 2016/17, foi de 9.049,2 mil hectares, com aumento de 4,6% em relação à safra anterior. Nesta safra o país produziu 38,7 milhões de toneladas de açúcar e 27,8 bilhões de litros de etanol (CONAB,

2017a), se destacando também como o maior produtor mundial de etanol e açúcar (MAPA, 2016).

O Estado de Goiás está se estabelecendo como potência nacional na produção de etanol e açúcar, fato que torna o setor sucroalcooleiro goiano como uma das principais fontes empregadoras no estado e geradoras de divisas (CONAB, 2016). O Estado possui a segunda maior área colhida (9,6 milhões de hectares) e produção (67,6 milhões de toneladas) no país, sendo o quarto maior produtor de açúcar (5,4% da produção nacional) e segundo maior produtor de etanol (15,7% da produção nacional), tanto anidro quanto hidratado (CONAB, 2017a).

Em Goiás, nas áreas de renovação do canavial estão sendo empregadas novas variedades de cana-de-açúcar, mais resistentes a pragas e doenças, além de mais produtivas (CONAB, 2017b). Apesar da variedade RB86-7515 (lançada no final da década de 90, período pré-mecanização de plantio e colheita) ser a principal variedade cultivada no Estado, representando 29,9% das variedades plantadas na região (IAC, 2016), conforme novas variedades estão sendo lançadas, a RB86-7515 vem perdendo concentração. O censo varietal de cana-de-açúcar de 2017 indicou que a intenção de plantio da variedade RB86-7515 teve redução de 13,3%, dando destaque para a variedade CTC-4, sendo a segunda principal variedade (11,9%) de intenção de plantio em Goiás (Braga Júnior et al., 2017). A variedade CTC-4 apresenta como principais características alta produtividade e alto teor de sacarose (CTC, 2013).

Dentro desse complexo sistema de produção, do qual envolvem diferentes ambientes de cultivo (clima e solo) e variedades, a identificação da maturação da cana-de-açúcar é um dos aspectos primordiais, visto que o funcionamento constante das usinas, durante os períodos de safra, depende do fluxo contínuo de matéria-prima. Assim, há inerente necessidade do desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na descrição e compreensão dos padrões de maturação da cana-de-açúcar, visto que este conhecimento é essencial para o planejamento da colheita.

A maturação dos colmos marca a última etapa do ciclo fenológico da cana-de-açúcar, em que ocorre o acúmulo de sacarose, que determina a qualidade da matéria-prima dos colmos industrializáveis. Ao iniciar o processo de maturação, a planta reduz a assimilação (produção de glicose e frutose), paralisa o crescimento e inicia a concentração de açúcar até atingir valores aceitáveis pela indústria (Segato et al., 2006). Os valores recomendados são POL acima de 14% e pureza de pelo menos 85% (Vian, 2011). Para se

estimar o índice da maturação por meio do teor de sólidos solúveis (°Brix), recomenda-se que esse valor no ápice do colmo em relação a sua base esteja na faixa de 0,85 a 1,00 (Rossetto, 2011).

O processo de maturação fisiológica da cana-de-açúcar depende da redução sazonal da temperatura, a qual retarda a taxa de desenvolvimento vegetativo sem, porém, afetar significativamente o processo fotossintético, de maneira que haja maior saldo de produtos fotossintetizados transformados em açúcares para armazenamento nos tecidos da planta (Cintra et al., 2008). No caso da maturação, considera-se que temperaturas abaixo de 20 °C retardam a taxa de crescimento da cana-de-açúcar e proporcionam acúmulo de sacarose em seus colmos (Scarpari & Beauclair, 2004; Scarpari, 2007). Isto é devido, pois, quando a cana-de-açúcar é desenvolvida sob regime de baixas temperaturas (13 a 19 °C) são observadas reduções de até 61,9% na assimilação líquida de CO₂ e 56,0% na taxa máxima de carboxilação da Rubisco (Guerra et al., 2014).

Em áreas tropicais, onde a temperatura não limita o crescimento, a maturação da cana-de-açúcar é induzida, principalmente, pela exaustão da água armazenada no solo (André et al., 2010). O déficit hídrico induz à redução do crescimento da parte aérea (Silva et al., 2008), sendo constatadas reduções no alongamento dos colmos, em torno de 60%, no seu diâmetro, de 55 a 75% (Ecco et al., 2014) e na área foliar, em 64% (Barbosa et al., 2015). Com isso, há incremento de ao menos 10% no conteúdo de sacarose na cana-de-açúcar (Machado et al., 2009) devido à reduzida demanda de fotoassimilados nas regiões meristemáticas (Taiz & Zeiger, 2013).

Nas usinas sucroalcooleiras a determinação da maturação da cana-de-açúcar é estimada, principalmente, pela quantificação do nível de sacarose e de açúcares redutores presentes no colmo da planta. Esta quantificação envolve coletas a campo e análises laboratoriais o que a torna dispendiosa. Ainda, a cultura da cana-de-açúcar é submetida a diferentes condições ambientais durante suas fases fenológicas, ao longo das safras, o que afeta diretamente a maturação (Scarpari & Beauclair, 2004). Assim, a investigação da maturação da cultura é realizada durante semanas, a fim de determinar seu ponto de colheita.

A previsão da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis agroclimatológicas, por meio de modelos, é uma ferramenta útil, pois tornam a determinação da maturação menos onerosa, além de auxiliar as usinas sucroalcooleiras nas estimativas de rendimento ao longo da safra, auxiliando na gestão e na tomada de decisões

estratégicas ao longo da safra (Scarpari & Beauclair, 2009). Ainda, permitem a compreensão dos mecanismos de resposta da cultura às condições ambientais (Tejera et al., 2007; Cardozo et al., 2015). A modelagem matemática vem sendo utilizada como ferramenta para a estimativa do crescimento, desenvolvimento e produção vegetal. O setor agrícola tem sido beneficiado com modelos de previsão de safra de algumas culturas, como a cana-de-açúcar, pois auxiliam no planejamento das atividades, desde o plantio até a colheita.

Esses modelos têm sido empregados principalmente como instrumentos de pesquisa que auxiliam na integração do conhecimento sobre o comportamento das culturas, na análise de experimentos de campo e na avaliação do impacto da seleção de cultivares (Marin et al., 2014). Alguns modelos de estimativa da maturação da cana-de-açúcar foram desenvolvidos para a região sudeste do Brasil (Scarpari & Beauclair, 2004; Scarpari & Beauclair, 2009; Cardozo et al., 2015) dos quais apresentaram resultados satisfatórios, podendo ser empregados em regiões com condições climáticas às quais estes modelos foram desenvolvidos.

A estimativa da alocação dos fotoassimilados em sacarose ainda apresenta grande dificuldade devido ao insuficiente conhecimento que se tem dos processos que envolvem a interação das condições climáticas e as respostas fisiológicas da cana-de-açúcar (Scarpari & Beauclair, 2009). Ressalta-se a importância da determinação do acúmulo de sacarose, em termos do grau de maturação da cultura, para o planejamento estratégico da colheita e a otimização do retorno econômico da cultura (Cardozo, 2012).

Assim, este trabalho teve como objetivo quantificar as relações e tendências entre variáveis agrometeorológicas, déficit hídrico e maturação da cana-de-açúcar, bem como propor modelos empíricos para a estimativa do °Brix e do ATR.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Santo Antônio de Goiás-GO (16°29'8" S; 49°20'36" W; 780 m), em área experimental de aproximadamente 280 ha, arrendada pela destilaria CentroÁlcool[®]. Segundo a classificação climática de Köppen, a região possui clima do tipo Aw (tropical de savana), megatérmico, caracterizado por inverno seco (maio-outubro) e verão chuvoso (setembro-abril).

Os dados coletados são referentes aos anos-safra 2013/2014 (cana-planta), 2014/2015 (cana - 1ª soca) e 2015/2016 (cana - 2ª soca). A variedade de cana-de-açúcar cultivada na área foi a CTC 4. O sistema de plantio adotado foi o semi-mecanizado com mudas pré-brotadas, realizado em abril de 2013, com espaçamento de 1,5 m entre fileiras, após a sulcagem da área. A colheita de cana-de-açúcar foi feita manualmente, sendo que o primeiro corte ocorreu em setembro de 2014 e o segundo e terceiro cortes ocorreram em outubro de 2015 e 2016, respectivamente.

O experimento foi realizado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura franco-argilo-arenoso, sendo constituído por 27% de argila, 13% de silte e 60% de areia (EMBRAPA, 2013). O solo foi preparado com aração e gradagem. Aplicaram-se 2,0 t ha⁻¹ de gesso agrícola e 4,0 t ha⁻¹ de calcário para a correção do solo. No plantio, foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, e em cobertura 380 kg ha⁻¹ do formulado 18-00-27 (N-P-K). As plantas daninhas foram controladas pela aplicação de herbicidas para o controle de plantas daninhas de folhas largas, nas quantidades recomendadas pelo fabricante.

Para a coleta de dados foram demarcadas na área quatro unidades experimentais compostas por 5 linhas, de 15 m de comprimento. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (área homogênea), com cinco repetições. O teor de sólidos solúveis (°Brix) foi quantificado ao longo das safras estudadas, com auxílio do refratômetro digital de campo, em coletas quinzenais. Estes dados foram utilizados para o cálculo do índice de maturação (IM) da cana-de-açúcar, conforme metodologia de Fernandes & Benda (1985), sendo obtido pela relação do teor de sólidos solúveis (°Brix) dos colmos do terço superior e inferior da cana. Os valores do IM são interpretados da seguinte forma: cana verde (IM ≤ 0,60); cana em processo de maturação (0,60 < IM ≤ 0,85); cana madura (0,85 < IM ≤ 1,00) e cana em processo de declínio de sacarose (IM > 1,00).

As análises tecnológicas da cana-de-açúcar para a obtenção dos açúcares totais recuperáveis (ATR) foram coletados em uma frequência mensal a partir de 4 (cana-planta) a 5 (cana-soca) meses antes do corte, sendo selecionadas aleatoriamente dez colmos industrializáveis em cada parcela experimental, dos quais foram despontados, despalhados (Bidoia & Bidoia, 2008) e encaminhados para o laboratório da própria destilaria.

As variáveis climáticas utilizadas foram obtidas da estação agrometeorológica automática da Embrapa - Arroz e Feijão, localizada em Santo Antônio de Goiás – GO, distante 7 km da área.

Aplicou-se o balanço hídrico sequencial semanal para a cultura da cana-de-açúcar com evapotranspiração potencial de referência (ET_0) obtida pelo método de Penman-Monteith, padrão FAO, de acordo com Allen et al. (2006). O armazenamento de água no solo, via balanço hídrico, foi determinado em função da água facilmente disponível no solo para a cultura, sendo esta lâmina de água (47,57 mm) o resultado do produto da capacidade de água disponível no solo para a cultura (CAD) pelo fator de disponibilidade hídrica no solo (f). Para a evapotranspiração máxima da cana-de-açúcar de 7 mm dia⁻¹ tem-se $f=0,05$ (Doorenbos & Kassam, 2000) e, por meio de adequações, utilizando-se CAD=95,14 mm. Para esta adequação, um estudo preliminar descreveu a profundidade efetiva do sistema radicular e as características físico-hídricas do solo. Próximo à data dos cortes fez-se a avaliação visual do perfil do sistema radicular da cana-de-açúcar. Em cada unidade experimental foi aberta uma trincheira de $0,90 \times 0,60 \times 0,80$ m de comprimento, largura e profundidade, respectivamente, onde foi analisado o perfil de 0 a 0,80 m de profundidade, obtendo-se profundidade efetiva do sistema radicular médio igual a 0,60 m. Para a determinação do teor de água volumétrico (θ , m³ m⁻³) na capacidade de campo foram coletadas amostras indeformadas de solo nas profundidades 0,0-0,20; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, em anéis volumétricos, de cada parcela experimental. As amostras de solo foram saturadas por 24 horas e colocadas para drenar até a estabilização da sua massa, momento em que a condutividade hidráulica do solo tende à zero. Nesta situação, a umidade volumétrica média das amostras representa o teor de água na capacidade de campo ($\theta_{CC} = 0,399$ m³ m⁻³). Posteriormente foi determinado o teor de água no ponto de murcha permanente a partir da curva de retenção de água obtida em laboratório usando-se extrator de Richards, de acordo com Embrapa (1997), sendo obtido $\theta_{PMP} = 0,240$ m³ m⁻³.

Os graus-dia (°C) foram determinados com base na metodologia descrita por Villa Nova et al. (1972). Assim, para cada dia, foi calculado o valor de graus-dia pelas seguintes Equações:

Se $T_m > T_b$ e $T_M < T_B$:

$$GD = \frac{(T_M - T_m)}{2} + (T_m - T_b) \quad [4.1]$$

Se $T_m \leq T_b$ e $T_M < T_B$:

$$GD = \frac{(T_M - T_b)^2}{2(T_M - T_m)} \quad [4.2]$$

Se $T_m > T_b$ e $T_M > T_B$:

$$GD = \frac{2 \cdot (TM - Tm) \cdot (Tm - Tb) + (TM - Tm)^2 - (TM - TB)^2}{2 \cdot (TM - Tm)} \quad [4.3]$$

Se $Tm < Tb$ e $TM > TB$:

$$GD = \frac{(TM - Tb)^2}{2(TM - Tm)} - \frac{(TM - TB)^2}{2(TM - Tm)} \quad [4.4]$$

Se $TM < Tb$:

$$GD = 0 \quad [4.5]$$

em que TM é a temperatura máxima diária abaixo de 38 °C (Fauconier & Bassereau, 1975); Tm a temperatura mínima diária acima de 7 °C (Waldron et al., 1967); Tb a temperatura basal mínima igual a 20 °C (Barbieri & Villa Nova, 1977); TB a temperatura basal máxima igual a 35 °C (Pereira et al., 2015).

Foi empregada a análise de componentes principais a fim de se estimar a relação das variáveis meteorológicas e do déficit hídrico do solo com a maturação da cana-de-açúcar para as safras analisadas. Para a geração do gráfico biplot foram considerados os primeiros componentes principais cujos autovalores foram superiores à unidade (Kaiser, 1958).

Para a seleção de variáveis do modelo de regressão linear múltipla foram utilizadas as técnicas de todos os modelos possíveis e de seleção automática. Na técnica de seleção de todos os modelos possíveis, os critérios adotados para avaliação do modelo foram o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério de Informação de Bayesiano (BIC). Valores menores de AIC e BIC são preferíveis, contudo, ambos os critérios penalizam modelos com muitas variáveis (modelos com mais variáveis tendem a produzir menor SQE, mas usam mais parâmetros, o que eleva os valores de AIC e BIC), assim, para balancear o ajuste o valor do coeficiente de determinação múltipla (R_p^2) também foi utilizado como critério, uma vez que auxilia na identificação de variáveis não significativas. Para a seleção das variáveis pela técnica de seleção automática foram utilizados os métodos Forward, Backward e Stepwise, em que o critério utilizado para a adição e, ou, remoção de variáveis foi o teste F ($\alpha=0,05$).

Para a realização de todas as análises estatísticas foi utilizado o software Action (<http://www.portaction.com.br/>).

Após a seleção das variáveis os modelos de regressão linear múltipla, a escolha dos modelos tanto para a estimativa de teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) quanto de ATR (kg t^{-1}) foi realizada a partir de uma série de critérios, em que, para cada variável resposta, o

modelo que melhor se ajustou aos dados e apresentou menores erros de estimativa foi adotado para validação. Os valores estimados pelos modelos de regressão foram avaliados a partir do erro padrão de estimativa (EPE) (Equação 4.6), do erro médio (EM) (Equação 4.7), a raiz do erro quadrático médio (REQM) (Equação 4.8) e o erro médio absoluto (EMA) (Equação 4.9). A qualidade do ajuste (exatidão) obtida pelos modelos foi dada pelo coeficiente de determinação (R^2) (Equação 4.10), da qual está relacionada à aproximação dos valores estimados em relação aos observados. Essa aproximação é obtida pelo índice de concordância “d” (Equação 4.11) (Willmott et al., 1985), no qual seus valores variam de zero (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita). O desempenho dos modelos também foi avaliado utilizando-se o índice de confiança (c), conforme a Equação 4.13 em que r é o coeficiente de correlação simples de Person (Equação 4.12) e d é o índice de concordância. O coeficiente c é interpretado como: ótimo ($c > 0,85$); muito bom ($0,75 < c \leq 0,85$); bom ($0,65 < c \leq 0,75$); mediano ($0,60 < c \leq 0,65$), sofrível ($0,50 < c \leq 0,60$), mau ($0,40 < c \leq 0,50$) e péssimo ($c \leq 0,40$) (Camargo & Sentelhas, 1997).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n - 1}} \quad [4.6]$$

$$EM = \frac{1}{n} \cdot \sum(O_i - E_i) \quad [4.7]$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n}} \quad [4.8]$$

$$EMA = \frac{1}{n} \cdot \sum|O_i - E_i| \quad [4.9]$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad [4.10]$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(|O_i - E_i| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad [4.11]$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2}} \quad [4.12]$$

$$c = d \cdot r \quad [4.13]$$

em que O_i o valor observado, E_i o valor estimado e \bar{O} a média dos valores observados.

Tanto para a seleção de variáveis quanto na obtenção dos valores estimados pelos modelos, os resíduos foram analisados quanto à normalidade (teste de Anderson-Darling), homocedasticidade (teste de Breusch Pagan), independência (análise gráfica dos resíduos versus a ordem de coleta), existência de outlier (teste de Bonferroni) e multicolinearidade (fator de inflamação da variância – VIF) dos dados.

Para a validação dos modelos, estes foram empregados para estimar o teor de sólidos solúveis ($^{\circ}$ Brix) e o ATR (kg t^{-1}) das variedades de cana-de-açúcar SP80-1842, SP70-1143 e RB86-7515 produzidas no município de Santo Antônio de Goiás em diferentes anos-safra (2007/08, 2008/09, 2009/10, 2010/11 e 2011/12) com ciclos de cana-1^asoca, cana-2^asoca e cana-3^asoca. Os resultados da validação foram analisados pelos mesmos critérios adotados nas análises das estimativas.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Caracterização da maturação da cana-de-açúcar em Santo Antônio de Goiás

Para as condições climáticas do município de Santo Antônio de Goiás, o processo de maturação da cana-de-açúcar teve início ($IM > 0,6$) cerca de 220 dias após o corte (próximo à primeira semana do mês de maio) para os ciclos de cana-soca. No período estudado, os déficits hídricos ocorreram predominantemente entre os meses de maio a setembro, sendo observada redução de cerca de 40% na precipitação pluviométrica quando comparada aos valores das normais provisórias para o município.

No ciclo de cana-planta, a maturação da cana-de-açúcar ($IM > 0,85$) ocorreu aos 472 dias após o plantio (terceira semana do mês de julho), com graus-dia acumulados igual a 1666,41 $^{\circ}\text{C}$. Nesta safra, a umidade real do solo se apresentou abaixo da umidade crítica ($\theta_{\text{crít}} = 0,319 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) na quarta semana de maio, cerca de 415 dias após o plantio. Para o ciclo de cana-1^asoca, a maturação ocorreu quando os graus-dia acumulados foram cerca de 1115,50 $^{\circ}\text{C}$, aos 295 dias após o corte (quarta semana do mês de julho), para lâmina de água no solo inferior à sua umidade crítica a partir de 240 dias após o corte (DAC). No ciclo de cana-2^asoca, a maturação ocorreu com 1382,01 $^{\circ}\text{C}$ acumulados, aos 303 DAC (quarta semana do mês de julho). Nesta safra a umidade do solo se encontrou abaixo da crítica a partir de 190 DAC (primeira semana do mês de abril).

Demais trabalhos relacionaram a maturação da cana-de-açúcar com os graus-dia acumulados (soma térmica) e obtiveram valores inferiores aos apresentados nesse estudo. Almeida et al. (2008) observaram para o ciclo da cana-planta que o início da fase de maturação ocorreu a partir de 1500 GD acumulados, em torno de 240 dias após o plantio, sendo registrado nessa safra déficit hídrico entre 140 e 180 dias após o corte. No ciclo da cana-soca, a maturação teve início aos 950 GD acumulados (220 dias após o corte), com ocorrência de déficit hídrico a partir de 150 DAC. Teruel et al. (1997) obtiveram como resultados que o somatório dos graus-dia para o início da fase de maturação da cana-planta e cana-soca (sem ocorrência de déficit hídrico) são de 1300 e 1100 °C, respectivamente. Esses resultados indicam que sob condições de estresse hídrico a planta pode sofrer ajustes metabólicos e ter seus limites térmicos alterados.

4.3.2 Análise multivariada das variáveis agrometeorológicas e do déficit hídrico

As variáveis agrometeorológicas e as lâminas de déficit hídrico do solo foram agrupadas em dois componentes principais, sendo o ajuste capaz de explicar 79,0% das variâncias (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Análise de componentes principais das variáveis déficit hídrico do solo (DH, mm), déficit de saturação de vapor de água no ar (ds, kPa), evapotranspiração de referência acumulada (ET₀, mm), excedente hídrico (EXC, mm), graus-dia (GD, °C dia), lâmina de água no solo (L, mm) e precipitação pluviométrica (P, mm), em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

Componentes da variância	Componentes principais (CP)	
	1	2
Autovalores	4,19	1,33
Proporção (%)	59,9	19,1
Proporção acumulada (%)	59,9	79,0
Variáveis	Correlações com as componentes principais	
DH	-0,83	0,04
ds	-0,83	0,30
ET ₀	-0,56	0,50
EXC	0,86	0,37
GD	-0,41	0,80
L	0,89	0,26
P	0,90	0,38

Os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) foram utilizados para a análise do conjunto de dados, pois, segundo o critério de Kaiser (Kaiser, 1958), estes apresentaram autovalores maiores que 1, sendo suficiente para explicar a variância amostral total (Hongyu et al., 2016).

Observa-se, a partir do biplot (Figura 4.1), que as variáveis excedente hídrico (EXC), lâmina de água no solo (L) e precipitação pluviométrica (P) apresentam alta correlação entre si e, ainda, que a ocorrência destas variáveis indica menores valores dos índices de maturação (IM), ou seja, a ocorrência de disponibilidade hídrica do solo impediu o início do processo de maturação da cana-de-açúcar, resultando em $IM < 0,6$. A maturação da cana-de-açúcar ($IM > 0,85$) ocorreu, principalmente, devido ao déficit hídrico no solo (DH) e ao déficit de saturação de vapor de água no ar (ds).

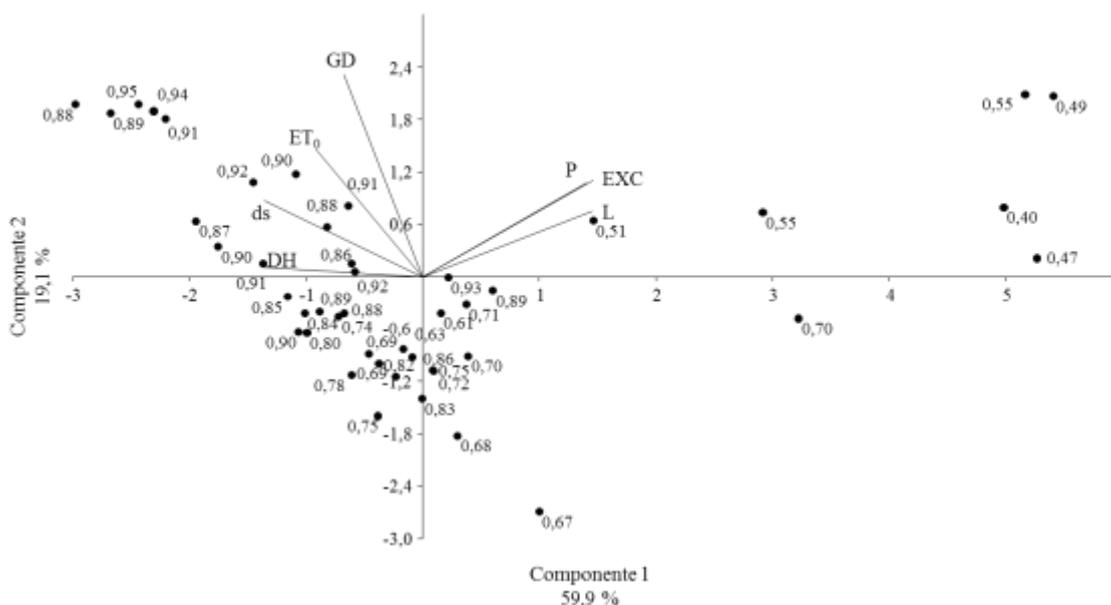


Figura 4.1. Análise de componentes principais e biplot das variáveis déficit hídrico do solo (DH, mm), déficit de saturação de vapor de água no ar (ds, kPa), evapotranspiração de referência (ET_0 , mm), excedente hídrico (EXC, mm), graus-dia (GD, °C dia), lâmina de água no solo (L, mm) e precipitação pluviométrica (P, mm) e do índice de maturação sobre as variáveis, realizada por matriz de correlação, em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

A disponibilidade de água no solo contribui positivamente com o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, pois a água tem papel fundamental nos processos bioquímicos que ativam a brotação, contribui com o perfilhamento e no acúmulo de fitomassa radicular e da parte aérea (Marin et al., 2009). Segundo Muraro et al. (2009) a disponibilidade hídrica do solo interfere no acúmulo de sacarose da cana-de-açúcar, sendo

o excedente hídrico atua como diluente da sacarose presente nos colmos, situação desfavorável para a maturação.

O déficit hídrico no solo reduz a taxa fotossintética, ocasionando redução na síntese de carboidratos e aumento no conteúdo de sacarose, contribuindo com a redução do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar e com o início do processo de maturação. O déficit hídrico induz o fechamento dos estômatos dos vegetais como resposta contra a desidratação imediata e tem como consequência a redução da transpiração foliar (Taiz & Zeiger, 2013). De acordo com Trentin et al. (2011), a taxa de transpiração diária da cana-de-açúcar pode alcançar valores menores que 73% sob condições de estresse hídrico severo no solo ($-1.500 < \Psi < -1.100$ kPa).

A transpiração vegetal, e consequentemente o processo de evapotranspiração, também sofrem interferência pelo déficit de pressão de vapor da atmosfera (Trentin et al., 2011). O aumento do d_s resulta no aumento da ET_0 , contudo, ressalta-se que esta condição do ambiente pode gerar perda excessiva de água pelas folhas, o que, em situação de déficit hídrico foliar, causa fechamento estomático com consequente redução da assimilação fotossintética de CO_2 (Bergonci et al., 2000; Silva et al., 2013) o que provoca consequente paralização do crescimento e desenvolvimento da cultura e acúmulo de sacarose. Assim, o déficit de saturação de vapor de água no ar também pode interferir diretamente com o processo de maturação da cana-de-açúcar. De acordo com Machado et al. (2009) a redução da assimilação de CO_2 na cana-de-açúcar em resposta ao déficit hídrico (40 a 50% da capacidade de campo) tem variação de intensidade conforme a fase fenológica da cultura, ocorrendo redução média de 58% na fase de crescimento inicial da cultura (exposta a 43 dias de déficit hídrico) e de aproximadamente 75% na fase de máximo crescimento (exposta a 15 dias de déficit hídrico) e 89% na fase de maturação (14 dias sob condição de déficit hídrico). Por ser uma planta de metabolismo C_4 , a cana-de-açúcar apresenta eficiência de carboxilação pela enzima PEPcase (fosfoenolpiruvato carboxilase), o que lhe confere maiores taxas de fotossíntese mesmo em condições de baixa assimilação de CO_2 (Taiz & Zeiger, 2013). De acordo com os resultados apresentados por Simões et al. (2015), mesmo sob redução de até 70% na transpiração da cana-de-açúcar, não são observadas reduções de suas taxas de fotossíntese líquida.

4.3.3 Modelagem matemática

Na seleção das variáveis para a obtenção do modelo de estimativa do teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) e dos açúcares totais recuperáveis (ATR) da cana-de-açúcar foram trabalhadas as variáveis edafoclimáticas: déficit hídrico (DH, mm), déficit de saturação de vapor de água no ar (ds, kPa), evapotranspiração de referência (ET_0 , mm), excedente hídrico (EXC, mm), graus-dia (GD, $^{\circ}\text{C}$ dia), lâmina de água no solo (L, mm) e precipitação pluviométrica (P, mm), sendo analisados seus valores atuais (at), ou seja, os valores obtidos nos dias das coletas de dados, seus valores acumulados (ac) ao longo do período estudado e suas respectivas taxas (tx). Ainda, foram considerados para o processo de modelagem apenas os dados obtidos a partir do início do processo de maturação da cana-de-açúcar ($IM > 0,6$), visando a estimativa do acúmulo de sacarose.

Foram avaliadas as tendências de colineariedade e realizados testes de normalidade, homocedasticidade, independência e existência de “outlier” nos resíduos das variáveis tecnológicas (teor de sólidos solúveis e açúcares totais recuperáveis) e edafoclimáticas selecionadas para os modelos. Os dados apresentaram distribuição normal (teste de Anderson-Darling, $p > 0,05$), homocedasticidade (teste de Breusch Pagan, $p > 0,05$) e pela ausência de tendência dos resíduos em função da ordem de coleta dos dados, admitiu-se haver indícios de independência dos erros. Ainda, pelo teste de Bonferroni ($p > 0,05$), não se rejeitou a hipótese de que as observações não são “outliers”. Também não houve indício de multicolinearidade das variáveis, das quais apresentaram $VIF < 10$ (Hair et al., 2009).

Considerando os resultados obtidos a partir dos critérios de escolha e ajuste dos modelos, foram adotadas as variáveis obtidas pelo método de seleção de todos os modelos possíveis, do qual selecionou para o modelo de $^{\circ}\text{Brix}$ as variáveis GD_{ac} ($^{\circ}\text{C}$ dia), ET_{0ac} (mm) e L_{at} (mm). Para essas variáveis os valores de AIC e BIC obtidos foram, respectivamente, 155,5 e 163,3 e o coeficiente de determinação múltipla (R_p^2) igual a 0,616. As variáveis selecionadas e seus respectivos coeficientes na equação de regressão linear múltipla, incluindo o intercepto do modelo, foram significativos ($p < 0,05$) para a estimativa do teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) da cana-de-açúcar, sendo este modelo adotado (Equação 4.14):

$$^{\circ}\text{Brix} = 23,30506 + 0,011492 \cdot GD_{ac} - 0,00552 \cdot ET_{0ac} - 0,06914 \cdot L_{at} \quad [4.14]$$

Para a estimativa de ATR (kg t^{-1}) a técnica de seleção de dados que apresentou resultados mais satisfatórios também foi por todos os modelos possíveis, do qual selecionou as variáveis GD_{ac} ($^{\circ}\text{C dia}$), $\text{ET}_{0\text{ac}}$ (mm) e L_{at} (mm), obtendo-se $\text{IAC}=324,0$; $\text{BIC}=332,4$ e $\text{R}_p^2=0,662$. As variáveis edafoclimáticas selecionadas para obtenção do modelo (Equação 4.15) apresentaram-se significativas ($p<0,05$) para a estimativa de ATR (kg t^{-1}), assim como também foram significativos ($p<0,05$) seus respectivos coeficientes na equação e o intercepto.

$$\text{ATR} = 157,4421 + 0,09705 \cdot \text{GD}_{\text{ac}} - 0,04043 \cdot \text{ET}_{0\text{ac}} - 0,53469 \cdot \text{L}_{\text{at}} \quad [4.15]$$

Como descrito, ambos os modelos possuem as mesmas variáveis edafoclimáticas como preditoras, apresentando o GD_{ac} como variável aditiva, ou seja, variável diretamente proporcional ao acúmulo de sacarose, e as variáveis $\text{ET}_{0\text{ac}}$ e L_{at} apresentando-se inversamente proporcional às variáveis respostas (i.e., $^{\circ}\text{Brix}$ e ATR). Na elaboração dos modelos as faixas de valores de cada uma dessas variáveis foram: 929,89 a 1935,72 $^{\circ}\text{C}$ acumulados (GD_{ac}); 877,02 a 2123,63 mm acumulados ($\text{ET}_{0\text{ac}}$) e 144,04 a 191,61 mm (L_{at}). Sabe-se que tais variáveis preditoras apresentam importante influência no processo de maturação da cana-de-açúcar, sendo coerente o processo de seleção de variáveis indicar tal significância.

O conceito de graus-dia acumulado, ou soma térmica, é amplamente e satisfatoriamente utilizado para relacionar o efeito da temperatura do ar com o crescimento e desenvolvimento de uma cultura e se baseia na resposta da planta à temperatura do ar e na existência de temperaturas basais (Pilau et al., 2011). Além da importância desta variável na estimativa do tempo biológico das plantas, esta apresenta como notória vantagem sua simples determinação, sendo investigada em vários estudos para diversas culturas, como, por exemplo, a cana-de-açúcar (ver Teruel et al., 1997; Scarpari, 2007; Almeida et al., 2008). Conforme resultados destes estudos, ficou evidente a relação linear positiva entre os graus-dia acumulados e a maturação da cana-de-açúcar ($r>0,95$), estando também esta relação indicada nos modelos de estimativa de $^{\circ}\text{Brix}$ e ATR pelos coeficientes positivos da variável GD_{ac} . Ainda, os graus-dia acumulados apresentaram comportamento linear ao longo do tempo ($\text{R}^2>0,992$) em todas as safras.

Ao longo das safras, os valores predominantes (90%) de graus-dia foram entre 2 e 7 $^{\circ}\text{C}$. Os graus-dia mais elevados, entre 7 e 9 $^{\circ}\text{C}$, ocorreram principalmente nos meses

de setembro e outubro, correspondente ao período de corte das safras. Os menores valores de graus-dias registrados, de 0 a 2 °C, foram observados principalmente entre os meses de maio a julho, período em que as plantas estavam em processo de maturação ($IM > 0,6$). Ressalta-se que apesar das temperaturas mais amenas (que resultaram em $GD \leq 2$ °C) terem ocorrido no mesmo período do processo de maturação, não foi observado relação entre menores valores de GD e elevação dos índices de maturação, sendo obtido correlação linear (r) média igual a 0,4, o que indica que as temperaturas mais amenas não influenciaram no processo de maturação da cana-de-açúcar.

A ET_0 é uma variável meteorológica que expressa a máxima perda de água ou máxima demanda de água de uma cultura para as condições meteorológicas vigentes no ambiente e estabelece o nível ideal de disponibilidade hídrica no sistema solo, planta e atmosfera, a fim de se alcançar produção máxima possível (Ometto, 1981). Sabe-se que a ET_0 , pelo processo de transpiração vegetal, tem relação direta com a produção e acúmulo de sacarose da cana-de-açúcar, pois os processos de transpiração e de fotossíntese na planta utilizam-se simultaneamente dos estômatos (Taiz & Zeiger, 2004). Segundo Ometto (1981), os elementos meteorológicos que interferem nos valores de ET_0 são a radiação solar, temperatura do ar, déficit de saturação do vapor d'água na atmosfera e precipitação. Devido às características climáticas do município de Santo Antônio de Goiás, os máximos valores de ET_0 ocorreram nos meses de agosto e setembro, período em que a cana-de-açúcar entrava-se na fase fenológica de maturação ($IM > 0,85$). Observou-se também que no decorrer do processo de maturação ($0,6 < IM \leq 0,85$), a partir do mês de junho, os valores de ET_0 apresentaram tendência de aumento até o final da safra, assim, a ET_{0ac} apresentou, em todos os anos-safra estudados, comportamento quadrático ($R^2=0,99$). O acúmulo de sacarose também apresentou comportamento quadrático ($R^2=0,84$), porém, ressalta-se que o acúmulo de ET_0 foi crescente entre os meses de junho a setembro, enquanto as taxas de acúmulo de sacarose foi, em média, decrescente para este mesmo período, o que justifica a variável ET_{0ac} apresentar-se inversamente proporcional aos valores de teor de sólidos solúveis (°Brix) e dos açúcares totais recuperáveis (ATR) nos modelos de regressão linear múltipla.

Em regiões tropicais o processo de maturação da cana-de-açúcar é induzido, principalmente, pela exaustão da água armazenada no solo (André et al., 2010), e esta situação se caracteriza quando a lâmina de água presente no solo resulta em umidade abaixo da umidade crítica para a cultura. Na área de estudo, a lâmina de água presente no

solo manteve-se em média igual a 148,6 mm, predominantemente abaixo de 191,61 mm (lâmina de água necessária para que o solo alcance $\theta_{\text{crit}} = 0,319 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), a partir do mês de maio até setembro, o que caracterizou condição de déficit hídrico do solo para esse período. Consideram em ambas as equações os coeficientes negativos da variável L_{at} , infere-se que a redução da lâmina de água no solo contribuiu positivamente no incremento de sacarose. Inman-Bamber (2004) constataram que o acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar é influenciado pela lâmina de água no solo. Esses autores afirmam que a ocorrência de déficit hídrico superior a 120 mm (e até 145 mm) contribui positivamente no incremento de sacarose, mesmo que seja observada redução de fitomassa da planta. Vieira et al. (2013) também observaram que a lâmina de água presente no solo interfere na maturação da cana-de-açúcar, variedade RB86-7515, constatando, porém, que a partir de 29 dias de déficit hídrico ocorre redução de 3,8% do índice de maturação. Já Machado et al. (2009) não observaram variações significativas nos valores de sacarose na cana-de-açúcar em relação à alteração da lâmina de água no solo no período de maturação. Oliveira et al. (2012) constataram que diferentes variedades de cana-de-açúcar apresentam comportamentos distintos no acúmulo de sacarose em função do teor de água no solo, podendo estas respostas serem significativas ou não.

As variáveis da equação de estimativa do °Brix (Equação 9) explicam 61,6% (R_p^2) dos dados coletados, isto é, o acúmulo de teor de sólidos solúveis nas células parenquimáticas do colmo da cana-de-açúcar. O modelo apresentou desempenho muito bom ($c=0,774$) e correlação linear dos dados observados e estimados igual a $r=0,778$, com $EM=-0,010$ °Brix e $EMA=1,149$ °Brix, observando-se exatidão dos valores observados em campo com os valores estimados pelo modelo devido ao coeficiente de concordância igual a 0,995 (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM), raiz do erro quadrático médio (REQM), erro médio absoluto (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos modelos de estimativa do teor de sólidos solúveis (°Brix) e dos açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t^{-1}).

Modelo	EPE	EM	REQM	EMA	d	r	c
°Brix	1,529	-0,010	1,509	1,149	0,995	0,778	0,774
ATR	12,493	-0,226	12,332	9,880	0,996	0,813	0,810

Cardozo et al. (2015) propuseram modelos exponenciais baseados na precipitação acumulada, específica do município de Piracicaba-SP, para a estimativa de

°Brix para variedades de cana-de-açúcar. Em todos os modelos os valores de R^2 ajustado foram maiores que 0,97, o que, segundo o autor, indica boa precisão dos modelos. Estes modelos também apresentaram exatidão ($d > 0,94$), ótimo desempenho ($c > 0,93$) e erro médio absoluto máximo de 1,1 °Brix. Ao se aplicar o modelo em Capivari-SP, observou-se superestimativa dos resultados ($EM > 0,68$ °Brix) e em Jaú-SP houve subestimativas nos valores de °Brix ($EM < -0,81$ °Brix).

O modelo de estimativa de ATR (kg t^{-1}), Equação 10, explica 66,2% (R_p^2) da variabilidade dos dados obtidos a campo devido às variáveis edafoclimáticas GD_{ac} (°C dia), ET_{0ac} (mm) e L_{at} (mm). Para estimativas ao longo da safra, o modelo apresentou erro médio absoluto (EMA) de $9,880 \text{ kg t}^{-1}$ e EM igual a $-0,226 \text{ kg t}^{-1}$. De acordo com o coeficiente de confiança, o modelo apresenta desempenho muito bom ($c = 0,810$) e, ainda, correlação linear positiva ($r = 0,813$) dos valores estimados com os valores observados. O coeficiente de concordância ($d = 0,996$) indicou aproximação dos dados observados e estimados (Tabela 4.2), sendo este resultado corroborado pelo gráfico de dispersão dos dados (Figura 4.2 B), no qual se observa distribuição amostral próxima à reta 1:1.

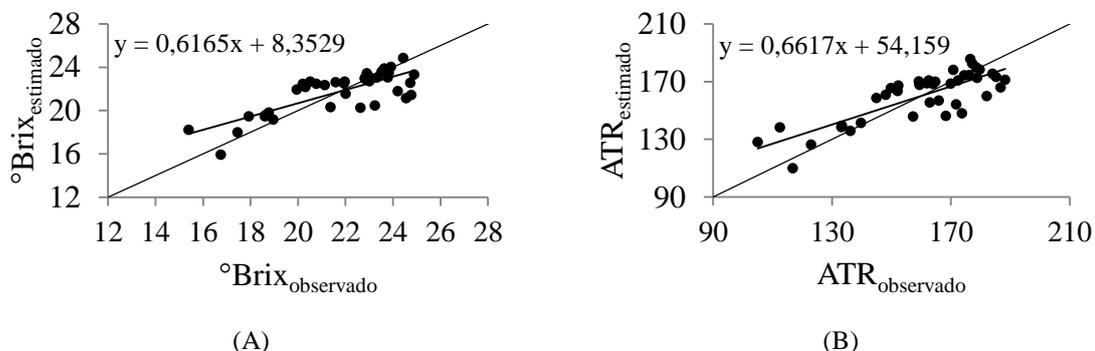


Figura 4.2. Relação dos valores observados e estimados por meio dos modelos de regressão linear múltipla dos (A) teor de sólidos solúveis (°Brix) e dos (B) açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t^{-1}) da cana-de-açúcar, em Santo Antônio de Goiás, Goiás. Reta contínua representa proporção 1:1.

Scarpari (2009) propôs modelos de regressão linear múltipla para estimativa de ATR e obteve para o modelo desenvolvido para uma cultivar tardia (RB72454) valor do coeficiente de determinação $R^2 = 0,26$. Cardozo et al. (2015), trabalhando com variáveis agrometeorológicas do município de Piracicaba-SP, sugeriram modelos exponenciais de determinação de ATR em função da precipitação pluviométrica total acumulada durante 120 dias antes da amostragem para variedades de cana-de-açúcar precoces, médias e tardias e obtiveram ótimo desempenho dos modelos ($c = 0,99$), com erros médios absolutos

(EMA) menores que $6,0 \text{ kg t}^{-1}$ e erros médios positivos ($EM > 4,13 \text{ kg t}^{-1}$) indicando superestimativa dos dados em Capivari-SP e erros médios negativos ($EM < -3,86 \text{ kg t}^{-1}$) devido à subestimativas em Jaú-SP.

A análise gráfica das estimativas pode ser realizada pela Figura 4.2, obtendo-se que a distribuição dos valores de $^{\circ}\text{Brix}$ observados versus estimados tendem a reta 1:1 (Figura 4.2 A). Contudo, observou-se pela linha de tendência da regressão que o modelo tende a superestimar, em cerca de 5%, valores de teor de sólidos solúveis menores que 22°Brix e superestimar em 2,3% valores maiores (acima de 22°Brix). A relação entre os valores estimados de ATR com os observados a campo também apresentaram distribuição tendendo à proporção 1:1 (Figura 4.2 B). Porém, ressalta-se que o modelo pode apresentar 5,5% de superestimativa dos valores de ATR menores que 160 kg t^{-1} e a partir deste valor o modelo tende a subestimar os resultados em até 2,9%. Essas tendências de sub e superestimativas também podem ser confirmadas pelo fato de os coeficientes angulares das equações lineares simples ($^{\circ}\text{Brix}$, $b=0,6165$; ATR, $b=0,6617$) serem inferiores a 1, o que caracteriza a ocorrência de erro sistemático percentual, isto é, os erros variam ao longo da série de dados, com aumento do erro em condições de menores concentrações de teor de sólidos solúveis e açúcar total recuperável no caldo da cana.

4.3.4 Validação dos modelos

As análises da validação dos modelos são apresentadas na Tabela 4.3. O modelo de determinação do teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) apresentou resultados satisfatórios para as variedades estudadas (Tabela 4.3), para os diferentes ciclos e anos-safra, com coeficiente de correlação a partir de 0,79 entre as variedades. O menor erro médio absoluto foi observado para a variedade SP80-1842 ($EMA=1,383^{\circ}\text{Brix}$) apresentando ótimo desempenho ($c=0,903$) e concordância $d=0,952$, e a estimativa menos satisfatório foi para a variedade RB80-7515 com $EMA=2,53^{\circ}\text{Brix}$, mas ainda indicando muito bom desempenho ($c > 0,75$) com concordância de estimativa de $d=0,976$. Estes resultados indicam a viabilidade da aplicação deste modelo para estimativa de teor de sólidos solúveis em diferentes variedades para o qual foi inicialmente desenvolvido.

Tabela 4.3. Coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM), raiz do erro quadrático médio (REQM), erro médio absoluto (EMA), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) dos modelos de estimativa do teor de sólidos solúveis ($^{\circ}$ Brix) e dos açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t^{-1}) para as variedades SP80-1842, SP70-1143 e RB86-7515 produzidas em diferentes anos-safra (2007/08, 2008/09, 2009/10, 2010/11 e 2011/12), em Santo Antônio de Goiás, Goiás.

Modelo	Variedade	EPE	EM	REQM	EMA	d	r	c
$^{\circ}$ Brix	SP80-1842	1,781	-1,023	1,593	1,383	0,952	0,947	0,903
	SP70-1143	2,339	-0,803	1,910	1,869	0,831	0,989	0,822
	RB86-7515	3,048	-1,695	2,951	2,530	0,976	0,790	0,771
ATR	SP80-1842	18,746	-9,093	16,767	15,558	0,923	0,833	0,752
	SP70-1143	27,244	-11,754	22,245	21,255	0,720	0,996	0,717
	RB86-7515	24,235	-11,808	23,465	20,270	0,978	0,818	0,800

Os valores de ATR estimados por meio do modelo (Tabela 4.3) também apresentaram correlação linear positiva com os valores obtidos em campo ($r > 0,81$), sendo os melhores resultados observados para a variedade SP80-1842 ($\text{EMA} = 15,558 \text{ kg t}^{-1}$, $d = 0,923$) que teve desempenho muito bom ($c = 0,752$). As variedades SP70-1143 e RB86-7515 apresentaram valores de EMA superiores a 20 kg t^{-1} , cerca de 14% de erro absoluto de estimativa, embora as estimativas tenham apresentado desempenho bom e muito bom, respectivamente.

Marin et al. (2011) utilizaram o modelo DSSAT/CANEGRO para estimar, dentre outras variáveis, o teor de sólidos solúveis das variedades RB72-454 e SP83-2847, do qual obtiveram como resultados valores do coeficiente de concordância (d) iguais a 0,68 e 0,72, respectivamente. Esses resultados foram superiores aos encontrados por Nassif et al. (2012) para as variedades CTC-4, CTC-7 e CTC-20, em que os valores do coeficiente de concordância variaram entre 0,47 a 0,55 e com raiz do erro quadrático médio (REQM) de até 2,61 $^{\circ}$ Brix. Inman-Bamber et al. (2009) ressaltam que erros de estimativas de acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar são devidos ao conhecimento insuficiente do complexo processo de maturação da planta.

Observa-se na Figura 4.3 que para valores médios de até 18 $^{\circ}$ Brix o modelo tendeu a superestimar os resultados em cerca de 9% e para maiores concentrações de teor de sólidos solúveis (acima de 18 $^{\circ}$ Brix) há subestimativa de 10% dos valores. Para valores de ATR de até 130 kg t^{-1} o modelo apresentou resultados superestimados e para maiores valores os resultados foram subestimados. Estes erros de estimativas ficaram em torno de 12%. Essas tendências de subestimativas e superestimativas dos $^{\circ}$ Brix e ATR foram

previstas a partir da curva que descreve a regressão linear simples dos dados estimados em função dos observados e pelos respectivos coeficientes angulares da equação (Figura 4.2). Contudo, a tendência de subestimativas tem maior relevância, visto que todos os erros médios foram negativos (Tabela 4.3).

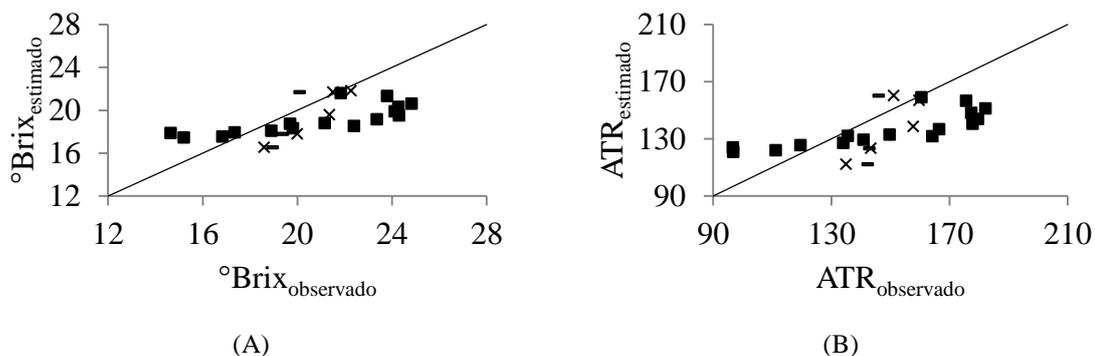


Figura 4.3. Relação dos valores observados e estimados por meio do modelo de regressão linear múltipla dos (A) teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) e dos (B) açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t^{-1}) para as variedades de cana-de-açúcar SP80-1842 (x), SP70-1143 (-) e RB86-7515 (■), em Santo Antônio de Goiás, Goiás. Reta contínua representa proporção 1:1.

Os resultados apresentados por Singels et al. (2008) para experimentos na África do Sul e Marin et al. (2011) na região sudeste do Brasil mostraram a mesma tendência observada aqui, superestimando o conteúdo de sacarose em condições de baixa concentração de sacarose, e o oposto à medida que o teor de sólidos solúveis aumentou. Cardozo (2012) sugere o uso de modelos exponenciais visando otimizar o ajuste na estimativa do acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar e ressalta para a importância de se validar os modelos em condições distintas das quais foram desenvolvidos e a possibilidade de necessidade de ajuste para melhores estimativas.

4.4 CONCLUSÃO

As variáveis meteorológicas que influenciam a ocorrência da maturação da cana-de-açúcar são, principalmente, o déficit hídrico do solo e o déficit de saturação de vapor de água no ar.

As variáveis meteorológicas que melhor explicam o processo de maturação da cana-de-açúcar, em acúmulo de açúcares totais recuperáveis e do teor de sólidos solúveis, são os graus-dia acumulados (influncia positivamente), ET_0 acumulado e lâmina de água

atual no solo (inibem a maturação), das quais explicam mais de 60% da variabilidade dos dados.

Os modelos propostos são aptos na determinação do processo de maturação da cana-de-açúcar, com desempenho satisfatório nas avaliações. Também apresentam satisfatória aplicação para estimativas de outras variedades.

Recomenda-se o uso desses modelos a partir do início do processo de maturação da cana-de-açúcar, quando o índice de maturação é superior a 0,6.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 2006. 300p. **Irrigation and Drainage**, Paper 56.

ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORA, I.; BARBOSA, G.V.S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R.A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência Agrotecnológica**, Lavras, v.32, n.5, p.1441-1448, 2008.

ANDRÉ, R.G.B.; MENDONÇA, J.C.; MARQUE, V.S.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.25, n.3, p.375-382, 2010.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: **Planalsucar**, Coordenadoria Regional Sul. COSUL. Araras. 1977. p.1-22.

BARBOSA, A.M.; GUIDORIZI, K.A.; CATUCHI, T.A.; MARQUES, T.A.; RIBEIRO, R.V.; SOUZA, G.M. Biomass and bioenergy partitioning of sugarcane plants under water deficit. **Acta Physiologiae Plantarum**, Poznan, v.37, p.142-149, 2015.

BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.8, p.1531-1540, 2000.

BIDOIA, M.A.P.; BIDOIA, M.A.P. Experimentação com cana-de-açúcar. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Org.) **Cana-de-açúcar**. 1 ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2010. p. 809-819.

BRAGA JÚNIOR, R.L.C.; LANDELL, M.G.A.; SILVA, D.N. et al. **Censo varietal IAC de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil – Safra 2016/17**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2017. 40 p. online (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 217). Disponível em: < <http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/porassunto/pdf/Boletim217.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2017.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARDOZO, N.P. **Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas**. 2012. 201p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C.; PANOSSO, A.R.; PALHARES, A.L.; IDE, B.Y. Modeling sugarcane ripening as a function of accumulated rainfall in Southern Brazil. **International Journal of Biometeorology**, Lisse, v.59, n.12, p.1913–1925, 2015.

CINTRA, J.E.V.; FERREIRA, G.H.; BRASIL, R.P.C. Viabilidade da irrigação suplementar na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) em regiões com déficit hídrico. **Nucleus**, Ituverava, Edição Especial, 2008.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v.2 - Safra 2015/16, n.4 - Quarto levantamento, Brasília: Conab, 2016. p.1-76. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_14_09_06_31_boletim_cana_portugues_4o_lev_15-16.pdf>. Acesso em 10 out. 2016.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v.3 - Safra 2016/17, n.4 - Quarto levantamento, Brasília: Conab, 2017a. p.1-77. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_19_11_27_36_boletim_cana_portugues_4o_lev_16-17.pdf>. Acesso em 10 nov. 2017.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v.4 - Safra 2017/18, n.2 - Segundo levantamento, Brasília: Conab, 2017b. p.1-73. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_08_24_08_59_54_boletim_cana_portugues_2o_lev_17-18.pdf>. Acesso em 10 nov. 2017.

CTC. CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Revista variedades CTC**. 2013. Disponível em: <<http://www.ctcanavieira.com.br/downloads/variedades2013WEB3.pdf>> Acesso em 27 de março de 2017.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de GHEYI, H.R.; SOUSA, A.A; DAMASCENO, F.A.V.; MEDEIROS, J.F. Campina Grande: UFPB, 2000. 221p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33, 2.ed.).

ECCO, M.; SANTIAGO, E.F.; LIMA, P.R. Respostas biométricas em plantas jovens de cana-de-açúcar submetidas ao estresse hídrico e ao alumínio. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v.5, n.1, p.59-67, 2014.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Variedades**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_42_1110200717570.html>. Acesso em: 01 de maio de 2017.

FAO. Food and Agriculture Organization (FAO). **FAOSTAT**. 2016. Disponível em: <<http://faostat.org/>>. Acesso em 15 out. 2016.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azúcar**. Barcelona: Editorial Blume, 1975. 433p.

FERNANDES, A.C.; BENDA, G.T.A. Distribution patterns of Brix and fibre in the primary stalk of sugar cane. **Sugar Cane**, Mandeville, v.5, p.8-13, 1985.

HAIR JR., J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. Tradução Adonai Schlup Sant'Anna e Anselmo Chaves Neto. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

GUERRA, A.; BARBOSA, A.M.; GUIDORIZI, K.A.; SOUZA, G.M. Efeitos da temperatura do ar na fotossíntese da cana-de-açúcar na fase inicial do desenvolvimento. **Revista Agrarian**, Dourados, v.7, n.24, p.211-217, 2014.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V.L.M.; OLIVEIRA JÚNIOR, G.J. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, Cuiabá, v.5, n.1, p.83-90, 2016.

IAC. INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Censo realizado pelo IAC identifica variedades de cana predominantes na região Centro-Sul do Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/noticiasdetalhes.php?pag=1&ano=2016&id=1141>>. Acesso em: 24 out. 2017.

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.; BONNETT, G.D.; SPILLMAN, M.F.; HEWITT, M.L.; XU, J. Source–sink differences in genotypes and water regimes influencing sucrose accumulation in sugarcane stalks. **Crop Pasture Science**, Victoria, v.60, p.316–327, 2009.

KAISER, H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, Williamsburg, v.23, n.3, p.187-200, 1958.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em 10 out. 2016.

MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JÚNIOR, J. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. 530p. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/home/publicacoes/agrometeorologia_dos_cultivos.pdf>. Acesso em 21 ago. 2016.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for sugarcane Brazilian production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v.103, p.100-110, 2011.

MARIN, F.R.; JONES, J.W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.71, n.1, p.1-16, 2014.

MURARO G.B.; ROSSI JÚNIOR, P.; OLIVEIRA, V.C.; GRANSOTTO, P.M.C.; SCHOGOR, A.L.B. Efeito da idade de corte sobre a composição bromatológica e as características da silagem de cana-de-açúcar plantada em dois espaçamentos e três idades de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.38, n.8, p.1525-1531, 2009.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE FILHO, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, GIAMPAOLO 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.

OLIVEIRA, R.A.; SANTOS, R.S.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; BARBOSA, M.H.P. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.5, p.549-557, 2012.

OMETTO, J.C. Evapotranspiração potencial. In: _____. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440p.

PEREIRA, J.A.; AGOSTINHO, E.; ISLER, P.R. Método de graus-dias para estimar o desenvolvimento da cana-de-açúcar. In: Simpósio Interdisciplinar de Tecnologias na Educação, I, 2015, Boituva, **Anais...** Boituva, p.217-224, 2015.

PILAU, F.G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; SCHWERZ, L. Temperatura basal, duração do ciclo e constante térmica para a cultura do crambe. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.4, p.958-964, 2011.

RIDESA. REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO. **Catálogo nacional de variedades "RB" de cana-de-açúcar**. Curitiba, 2010. 136 p.

RIDESA. REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO. **RB86-7515**. Disponível em: <http://www.canaufv.com.br/cultivaresRB/RB867515%20.pdf>> Acesso em: 01 maio 2017.

ROSSETTO, R. Maturação. In: MARIN, F.R. (ed.) **Cana-de-açúcar**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília – EMBRAPA. 2011. Disponível: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_90_22122006154841.html#>. Acesso em: 07 jan. 2017.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Sugarcane maturity estimation through edaphicclimatic parameters. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, p. 486-491, 2004.

SCARPARI, M.S. **PREDPOL**: um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado. Tese (doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, n.5, p.622-628, 2009.

SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. 415f.

SILVA, M.A.; SOARES, R.A.B.; LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.3, p.655-661, 2008.

SILVA, M.A.; SANTOS, C.M.; ARANTES, M.T.; BRUNELLI, M.C.; HOLANDA, L.A. Respostas fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica e a reidratação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.26, n.3, p.28-35, 2013.

SIMÕES, W.L.; CALGARO, M.; COELHO, D.S.; SOUZA, M.A.; LIMA, J.A. Respostas de variáveis fisiológicas e tecnológicas da cana-de-açúcar a diferentes sistemas de irrigação. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.46, n.1, p.11-20, 2015.

SINGELS, A.; M. JONES; M. VAN DER BERG. **DSSAT v4.5- CANEGRO Sugarcane Plant Module**: Scientific documentation. South African Sugarcane Research Inst. Mount Edgecombe, South Africa. 2008. 34p.

STUPIELLO, J. P. Variedades: ótica agrícola e ótica industrial. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.5. n.1, p.44-50, 1986.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução: SANTARÉM, E.R. [et al.] 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.

TEJERA, N.A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.102, p.64-72, 2007.

TERUEL, D.A.; BARBIERI, V.; FERRARO JÚNIOR, L.A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.54, n.spe, p.39-44, 1997.

TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A.J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.6, p.1085-1095, 2011.

VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; DELAZARI, F.T. Época de interrupção da irrigação na cultura da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v.18, n.3, p.426-441, 2013.

VILLA NOVA, N.A.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; PEREIRA, A.R.; OMETTO, J.C. **Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máximas e mínimas**. São Paulo: USP, 1972. (Caderno de ciências da terra, n. 30).

WALDRON, J.C.; GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A. The physiology of sugarcane. IX. Factors affecting photosynthesis and sugar storage. **Australian Journal Biological Sciences**, Melbourne, v.20, p.1043-1052, 1967.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n.C5, p.8995-9005, 1985.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A validação dos modelos apresentados em ambientes de cultivo com condições meteorológicas e de lâmina de água no solo distintas das quais foram gerados é importante e necessária de ser realizada, visto que a aplicabilidade de modelos empíricos para estas condições é constantemente questionada. Nesta situação, pode haver a necessidade de ajuste dos modelos em função das particularidades de cultivo adotadas. Isso ocorre, pois, os modelos expressam parâmetros de ajustes específicos para cada região de estudo de onde foram formulados, os quais envolvem características de solo, de clima e da genética das variedades.

Demais aspectos devem ser observados e podem ocasionar maiores desvios nas estimativas. Os modelos não consideram o uso de maturados, o florescimento da cana-de-açúcar e o ataque de pragas e, ou, doenças, visto que a ocorrência de algum desses eventos interfere diretamente no acúmulo de sacarose nos colmos da planta. Ainda, o manejo e correção do solo, principalmente em termos da disponibilidade de nitrogênio, também são condições de ambiente que podem influenciar nos valores estimados.

Em geral, os modelos desenvolvidos com os dados dos três ciclos de cultivo estudados apresentaram resultados satisfatórios, podendo ser empregados para o acompanhamento da safra e nas atividades de planejamento a fim de caracterizar o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar e determinar o ponto de colheita da cana-de-açúcar. Destaca-se também a fácil estimativa dos parâmetros das equações e a simples aplicação dos modelos, além do menor custo de determinação do acúmulo de sacarose em comparação com a metodologia tradicional de coleta de dados a campo.