



UFG

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

**RESPOSTAS DA VARIEDADE CTC-4 DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE
DADOS AGROCLIMÁTICOS E ESPECTRAIS EM SANTO ANTONIO DE GOIÁS**

DAYANNA TEODORO QUIRINO

Orientador:

Prof. Dr. Derblai Casaroli

Goiânia, GO – Brasil
2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

DAYANNA TEODORO QUIRINO

3. Título do trabalho

RESPOSTAS DA VARIEDADE CTC-4 DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE DADOS AGROCLIMÁTICOS E ESPECTRAIS EM SANTO ANTONIO DE GOIÁS

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **DAYANNA TEODORO QUIRINO, Discente**, em 02/08/2023, às 12:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Derblai Casaroli, Professor do Magistério Superior**, em 02/08/2023, às 13:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3933247** e o código CRC **12BC616B**.

Referência: Processo nº 23070.041377/2023-95

SEI nº 3933247

DAYANNA TEODORO QUIRINO

**RESPOSTAS DA VARIEDADE CTC-4 DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE
DADOS AGROCLIMÁTICOS E ESPECTRAIS EM SANTO ANTONIO DE GOIÁS**

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

Orientador:

Prof. Dr. Derblai Casaroli

Co-orientador:

Prof^a. Dra. Ieda Del'Arco Sanches

Prof. Dr. Adão Wagner P. Evangelista

Goiânia, GO – Brasil
2017

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

Quirino, Dayanna Teodoro

Respostas da variedade CTC-4 de cana-de-açúcar em função de dados agroclimáticos e espectrais em Santo Antônio de Goiás
[manuscrito] / Dayanna Teodoro Quirino – 2017.

CXV, 115 f.

Orientador: Prof. Dr. Derblai Casaroli; co-orientadora Dra. Ieda Del'Arco Sanches; co-orientador Dr. Adão Wagner Pego Evangelista
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás,
Escola de Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação
em Agronomia, Goiânia, 2017.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1.modelo agrometeorológico. 2.balanço hídrico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº PPGA/001/2017 da sessão de Defesa de Dissertação de **Dayanna Teodoro Quirino**, que confere o título de Mestra em Agronomia, na área de concentração em Solo e Água.

Aos vinte e nove dias do mês de setembro do ano de dois mil e dezessete, a partir das catorze horas, no Mini-auditório do PPGA, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “RESPOSTAS DA VARIEDADE CTC-4 DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE DADOS AGROCLIMÁTICOS E ESPECTRAIS EM SANTO ANTONIO DE GOIÁS”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Derblai Casaroli (EA/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Juliana Ramalho Barros (IESA/UFG), membro titular externo, Professor José Alves Júnior (EA/UFG), membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professor Derblai Casaroli, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e nove dias do mês de setembro do ano de dois mil e dezessete.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Derblai Casaroli, Professor do Magistério Superior**, em 25/07/2023, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Alves Júnior, Professor do Magistério Superior**, em 25/07/2023, às 11:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juliana Ramalho Barros, Professora do Magistério Superior**, em 27/07/2023, às 23:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3912957** e o código CRC **D7543821**.

*“É melhor tentar e falhar que preocupar-se e ver a vida passar.
É melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-se fazendo nada até o final.
Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder.
Prefiro ser feliz, embora louco, em que conformidade viver...”*

Martin Luther King

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o princípio de tudo, por ter me dado força, sabedoria e saúde para concluir este trabalho.

A minha família pelo carinho, atenção e motivação nesta etapa da minha vida.

Ao meu orientador Dr. Derblai Casaroli, pela amizade, orientação, paciência, compreensão, confiança, por todas as oportunidades de crescimento profissional que me proporcionou e pela incessante contribuição em todo desenvolvimento da dissertação. Seu empenho e inovação na pesquisa científica justifica a minha admiração e respeito pelo seu trabalho.

A minha co-orientadora Dr^a Ieda Del'Arco Sanches, pelo apoio, orientação e conhecimento compartilhado quebrando a barreira da distância e sendo essencial para meu crescimento profissional.

Ao meu co-orientador Dr. Adão Wagner Pego Evangelista que me conduziu e orientou antes mesmo da entrada efetiva na pós-graduação.

Agradeço ainda aos professores do Núcleo de Pesquisa em Clima e Recursos Hídricos do Cerrado, Dr. José Alves Júnior, Dr. Márcio Mesquita, Dr. Rilner Alves Flores pelos ensinamentos transmitidos na execução deste trabalho.

A doutoranda Jordana de Moura Caetano pela amizade, paciência e boa vontade em me auxiliar em momentos cruciais deste trabalho.

A doutoranda Tallyta Ramalho pela amizade, pelas risadas e lágrimas compartilhadas e seu apoio fundamental na caminhada deste mestrado.

A doutoranda Sulimar Munira do INPE pelo apoio, sugestões e disponibilidade no decorrer do trabalho no modelo agrometeorológico espectral.

Aos alunos de iniciação científica Anniely, Bárbara, Bruno, Brunna, Larissa, Lucas, Marília, Pedro, Rafael, por me auxiliar na condução desta pesquisa. E aos colegas de pós-graduação Allison, Ana Cláudia, Elson, Déborah, João Maurício, Miguel, Raiane, Rhérisson, Ricardo, Rodolfo, Rodrigo, Walter, obrigada pelo convívio, solidariedade e amizade compartilhadas durante todo esse tempo.

Ao secretário do PPGA Welinton Barbosa Mota pela amizade.

Aos amigos para a vida toda Wildson Pereira e Murylo Rodrigues por sempre andar do meu lado, estimulando e encorajando sempre ao longo da convivência diária.

Aos professores de graduação do IFG – Campus Goiânia, Hostílio Maia, João Cortes, Giovanni Bogionni, Nilton Ricetti e Avilmar Rodrigues que me mostraram a importância desde a graduação a sequência do aprimoramento acadêmico.

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

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

Ao pesquisador da EMBRAPA - Arroz e Feijão, agrometeorologista Silvano Carlos da Silva pelo auxílio com os dados climatológicos do município de Santo Antônio de Goiás.

A Usina Centroálcool por permitir a instalação do experimento na Fazenda Louzandira no município de Santo Antônio de Goiás-GO.

A todos vocês, meu muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE FIGURAS	12
RESUMO GERAL	13
GENERAL ABSTRACT	14
1 INTRODUÇÃO GERAL	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
CANA-DE-ACÚCAR.....	18
MORFOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR	20
Colmo 21	
2.2.1 Folhas	21
2.2.1 Inflorescencia	21
2.2.1 Raiz	22
2.3 FENOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR	22
EXIGÊNCIAS CLIMÁTICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR	24
2.4.1 Características climáticas do bioma Cerrado	26
2.4.2 Balanco hídrico de cultivo	27
MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE	28
2.6 SENSORIAMENTO REMOTO	31
2.5.1 Índice de vegetação	33
2.5.2 Dados espectrais	36
2.7 REFERÊNCIAS	37
3 CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA NAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO CERRADO GOIANO	50
RESUMO	50
ABSTRACT	50
INTRODUÇÃO	51
MATERIAL E MÉTODOS	53
RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS	80

4	ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DE CANA- DE-AÇÚCAR A PARTIR DE MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS-ESPECTRAIS	84
	RESUMO.....	84
	ABSTRACT.....	85
4.1	INTRODUÇÃO.....	85
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	87
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	98
4.4	CONCLUSÃO.....	113
4.5	REFERÊNCIAS.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.0	Produção agrícola Municipal	19
Tabela 2.0	Consumo hídrico da cana-de-açúcar.....	24
Tabela 3.0	Características espectrais das bandas dos sensores a bordo da plataforma Landsat-8.....	37
Tabela 3.1	Análise química do solo latossolo vermelho-amarelo distrófico em Santo Antônio de Goiás-Go.....	53
Tabela 3.2	Coefficiente da cultura (kc) para cana-planta e cana soca em diferentes períodos de desenvolvimento.....	56
Tabela 4.1	Coefficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (ky) calibrados para cultura da cana-de-açúcar em diferentes períodos de desenvolvimento	91
Tabela 4.2	Classificação do desempenho dos métodos de estimativa da produtividade agrícola pelo índice c.....	98
Tabela 4.3	Evapotranspiração da cultura (ETc) e evapotranspiração real (ETr) acumulada (mm) ocorrida em cada estágio fenológico da cultura de cana-de-açúcar cultivada em Santo Antônio de Goiás – Go, nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	100
Tabela 4.4	Deficiência hídrica acumulada (mm) ocorrida em cada estágio fenológico da cultura de cana-de-açúcar cultivada em Santo Antônio de Goiás – Go nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.0	Relação de unidades produtoras de etanol e açúcar do estado de Goiás associadas ao SIFAEG.....	19
Figura 2.0	Estádio fenológico da cana-de-açúcar.....	23
Figura 3.0	Curva de fator de reflectância típica de uma folha verde	34
Figura 3.1	Área de estudo de cultivo de cana-de-açúcar em Santo Antônio de Goiás, 10 km de Goiânia e 180 km de Brasília-DF.....	53
Figura 3.2	Área de experimento de cana-de-açúcar, variedade CTC4 em Santo Antônio de Goiás-Go 30 dias após o plantio.....	54
Figura 3.3	Precipitação ocorrida nos anos de 2013 a 2016 com a normal climatológica de precipitação registrada no período de 1986 à 2016 em Santo Antônio de Goiás-Go.....	59
Figura 3.4	Temperatura máxima, mínima e média ocorrida nos anos de 2013 a 2016 com a normal climatológica de temperatura no período de 1986 a 2016 em Santo Antônio de Goiás-Go e a temperatura ótima mínima e máxima para a cultura de cana-de-açúcar.....	60
Figura 3.5	Graus-dia acumulados mensalmente registrados durante os anos de 2013 a 2016 e graus-dia acumulado obtido com a normal climatológica da região de Santo Antônio de Goiás.....	62
Figura 3.6	Graus-dia negativo acumulados mensalmente registrados durante os anos de 2013 a 2016 e graus-dia acumulado negativo obtido com a normal climatológica da região de Santo Antônio de Goiás.....	63
Figura 3.7	Extrato do balanço hídrico mensal obtido com a normal climatológica com o excedente hídrico (EXC), deficiência hídrica (DEF), lâmina crítica, lâmina real, lâmina da capacidade de campo, lâmina do ponto de murcha permanente realizado no Santo Antônio de Goiás-Go das safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	64
Figura 3.8	Extrato do balanço hídrico diário com o excedente hídrico (EXC), deficiência hídrica (DEF), lâmina crítica, lâmina real, lâmina da capacidade de campo, lâmina do ponto de murcha permanente realizado no Santo Antônio de Goiás-Go das safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	66
Figura 3.9	Análise de regressão da média da altura (cm), média do diâmetro (mm), média de número de folhas verdes e a média do índice de área foliar e suas respectivas taxas de crescimento da cana-de-açúcar em função do tempo cultivada em Santo Antônio de Goiás-Go nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	71
Figura 3.10	Análise de regressão da média da altura da cana-de-açúcar versus a amplitude térmica, evapotranspiração da cultura (ETR), déficit hídrico, graus-dia e graus-dia-negativo em Santo Antônio de Goiás-Go nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	74
Figura 3.11	Análise de regressão da média do diâmetro da cana-de-açúcar versus a amplitude térmica, evapotranspiração da cultura (ETR), déficit hídrico, graus-dia e graus-dia-negativo em Santo Antônio de Goiás-Go nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	76
Figura 3.12	Análise de regressão da média do número de folhas verdes da cana-de-açúcar versus a amplitude térmica, evapotranspiração da cultura (ETR),	78

	déficit hídrico, graus-dia e graus-dia-negativo em Santo Antônio de Goiás-Go nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	
Figura 3.13	Análise de regressão da média do índice de área foliar da cana-de-açúcar versus a amplitude térmica, evapotranspiração da cultura (ETR), déficit hídrico, graus-dia e graus-dia-negativo em Santo Antônio de Goiás-Go nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	79
Figura 3.14	Toneladas de colmo por hectare observados no experimento e toneladas de colmo por hectares estimada pela usina após o corte de cana-de-açúcar cultivada em Santo Antônio de Goiás nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	80
Figura 4.1	Extrato do balanço hídrico diário com o excedente hídrico (EXC), deficiência hídrica (DEF) e a razão entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração da cultura (ETR/ETC) do Santo Antônio de Goiás-Go das safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.....	100
Figura 4.2	Produtividade potencial (PP), produtividade real (PR) estimada de cana-de-açúcar pelo método da Zona Agroecológica (ZAE) com os dados obtidos no canavial, para as safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 no município de Santo Antônio de Goiás-Go.....	104
Figura 4.3	Produtividade potencial (PP), produtividade real (PR) estimada de cana-de-açúcar pelo método da Zona Agroecológica (ZAE) com os dados tabelados da FAO, para as safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 no município de Santo Antônio de Goiás-Go.....	105
Figura 4.4	Produtividade potencial (PP), produtividade real (PR) estimada de cana-de-açúcar pelo método da Agrometeorológico Espectral, para as safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 no município de Santo Antônio de Goiás-Go.....	108
Figura 4.5	Produtividade real estimada de cana-de-açúcar pelo modelo proposto por Martins e Landell para as safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 estimadas no município de Santo Antonio de Goias-Go.....	110
Figura 4.6	Comparação entre a produtividades obtida na usina e a produtividade estimada pelos modelos ZAE com dados do canavial, ZAE dados fornecidos pela FAO, Agrometeorológico Espectral, modelo proposto por Martins e Landell e modelo proposto por Scarpari para as safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 estimadas no município de Santo Antonio de Goias-Go.....	111

RESUMO GERAL

QUIRINO, D. T. **Resposta da variedade CTC-4 de cana-de-açúcar em função de dados agroclimáticos e espectrais em Santo Antônio e Goiás.** 2017. 115 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água) Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.¹

A cana-de-açúcar é uma das culturas que apresenta relevância na economia brasileira devido à sua diversificada utilidade. Consequentemente, a disponibilidade de informações precisas sobre o comportamento biométrico, tolerância climática e produtividade da cultura podem auxiliar na tomada de decisão da implantação da variedade na região. Informações acerca das condições climáticas de uma região associada a modelos matemáticos de estimativa de produtividade agrícola possui importância para o setor sucroalcooleiro auxiliando a organização das operações nas usinas. Assim, este estudo teve por objetivo avaliar as respostas da cana-de-açúcar às variáveis agrometeorológicas do Centro-Oeste bem como comparar quatro métodos para estimativa de produtividade da cana-de-açúcar no município de Santo Antônio de Goiás. O experimento foi conduzido no município de Santo Antônio de Goiás, cuja área produtiva pertence à usina CentroÁlcool S.A. Utilizou-se a variedade de cana-de-açúcar CTC-04 em área produtiva de 193 ha, com cultivo realizado em condições de sequeiro. As avaliações foram realizadas em ciclo de cana-planta e cana-soca (1ª e 2ª soca), referente às safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016. Sendo as variáveis biométricas: altura, diâmetro, número de folhas verdes e índice de área foliar em relação ao tempo e as variáveis climáticas. A evapotranspiração foi obtida pelo método de Penman-Monteith padrão FAO, o balanço hídrico climatológico diário foi calculado pela metodologia proposta por Thornthwaite e Mather. A estimativa de produtividade da cultura de cana-de-açúcar foi estimada por quatro modelos: Zona Agroecológica (ZAE), modelo proposto por Scarpari, modelo proposto por Martins e Landell e o Agrometeorológico Espectral. O volume de precipitação nos anos de 2014, 2015 e 2016 nos períodos seco e chuvoso registrou volume inferior ao previsto na normal climatológica. A temperatura média do ar se manteve dentro do previsto para região. O balanço hídrico da cultura registrou nas safras 13/14, 14/15 e 15/16 um déficit hídrico acumulado de 857,91 mm, 772,38 mm, 599,81 mm respectivamente. O comportamento biométrico da cana-de-açúcar cultivada em Santo Antônio de Goiás apresentou uma taxa média de altura dos colmos e diâmetro nas safras de 13/14, 14/15 e 15/16 de 0,49 cm dia⁻¹, 0,022 mm, 1,14 cm dia⁻¹ 0,04 mm e 0,75 cm dia, 0,04 mm respectivamente. O número médio de folhas verdes foi de 7 folhas para safras 13/14 e 14/15 e 8 na safra 15/16. A variedade CTC-04 apresentou melhor índice de produtividade em cultivo de sequeiro em ciclo de cana-planta. Dentre os modelos analisados para estimar a produtividade de cana-de-açúcar o Agrometeorológico Espectral apresentou capacidade superior em relação aos demais para estimar a produtividade da cana-de-açúcar. Além disso a sua implementação possui baixo custo e permite que ao longo do cultivo se monitore as condições climáticas por estágio fenológico, identificando as perdas potenciais na produtividade provocadas pela deficiência hídrica. O modelo proposto por Scarpari apresentou melhor estimativa de produtividade de cana-de-açúcar em ciclo de cana-planta. O modelo proposto por Martins e Landell superestimou a produtividade real da cultura provavelmente por não contar com uma penalização da ocorrência de restrição climática.

Palavras-chaves: modelo agrometeorológico, balanço hídrico, análise biométrica

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

Co-adviser: Prof. Dr^a. Ieda Del'Arco Sanches, INPE.

Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista

GENERAL ABSTRACT

QUIRINO, D. T. **Response of the sugarcane variety CTC-4 as a function of agroclimatic and spectral data in Santo Antônio de Goiás.** 2017. 115 f. Dissertation (Master's degree in Agronomy: Soil and Water) College of Agriculture, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.¹

Sugarcane is one of the crops that has relevance in the Brazilian economy due to its diversified utility. Consequently, the availability of accurate information on biometric behavior, crop tolerance and crop productivity can assist in the decision-making of variety roll-out in the region. Information about the climatic conditions of a region associated with mathematical models of agricultural productivity estimation is important for the sugar and alcohol sector, helping to organize the operations in the plants. The objective of this study was to evaluate sugarcane responses to central-western agrometeorological variables as well as to compare four methods to estimate sugarcane productivity in the municipality of Santo Antonio de Goiás. The experiment was carried out in the municipality of Santo Antônio de Goiás, whose productive area belongs to the CentroAlcool S.A. plant. The sugarcane variety CTC-04 was used in a productive area of 193 ha, with cultivation in dry conditions. The evaluations were carried out in the cane-plant and cane-soca cycle (1st and 2nd soca), referring to the harvests of 2013/2014, 2014/2015 and 2015/2016. The biometric variables were: height, diameter, number of green leaves and index of leaf area in relation to time and climatic variables. Evapotranspiration was obtained by the FAO standard Penman-Monteith method, the daily climatological water balance was calculated by the methodology proposed by Thornthwaite and Mather. The estimation of productivity of the sugarcane crop was estimated by four models: Agroecological Zone (ZAE), model proposed by Scarpari, model proposed by Martins and Landell and Spectral Agrometeorological. The precipitation volume in the years of 2014, 2015 and 2016 in the dry and rainy periods registered a volume lower than predicted in the climatological normal. The average air temperature remained within the expected range. The water balance of the crop recorded in crop seasons 13/14, 14/15 and 15/16 an accumulated water deficit of 857.91 mm, 772.38 mm, 599.81 mm respectively. The biometric behavior of sugarcane cultivated in Santo Antônio de Goiás presented an average rate of stem height and diameter in the crops of 13/14, 14/15 and 15/16 of 0.49 cm day⁻¹, 0.022 mm, 1.14 cm dia⁻¹ 0.04 mm and 0.75 cm dia, 0.04 mm respectively. The average number of green leaves was 7 leaves for crops 13/14 and 14/15 and 8 in the 15/16 crop. The CTC-04 variety showed a better productivity index in rainfed cultivation in the cane-plant cycle. Among the models analyzed to estimate the sugarcane yield, Spectral Agrometeorological showed superior capacity in relation to the others to estimate sugarcane productivity. In addition, its implementation is low cost and allows throughout the crop to monitor the average climatic conditions by phenological stage, identifying the potential losses in productivity caused by water deficiency. The model proposed by Scarpari presented a better estimate of sugarcane productivity in the cane-plant cycle. The model proposed by Martins and Landell overestimated the actual productivity of the crop probably because it does not count on a penalization of the occurrence of climate restriction.

Key words: agrometeorological model, water balance, biometric analysis

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

Co-adviser: Prof. Dr^a. Ieda Del'Arco Sanches, INPE.

Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar possui destaque como uma das principais culturas de interesse econômico para o Brasil, fornecendo matéria-prima para a produção de açúcar, etanol e energia. A produção total de cana-de-açúcar no Brasil para a safra de 2016/2017 está estimada em 694,54 milhões de toneladas, com crescimento avaliado de 4,4 % em relação à safra anterior. A área a ser colhida está estimada em 9,1 milhões hectares, aumento de 5,3 % se comparada com a safra de 2015/2016, de acordo com a CONAB (2016), a produção de cana-de-açúcar no Brasil tem crescido nos últimos anos, sendo que os maiores índices de aumento de área plantada são encontrados nos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. O estado de Goiás é o segundo maior produtor nacional com 9,9% (1.821,1 mil hectares) de área plantada com o cultivo de cana-de-açúcar.

Em razão da inferência econômica, social e ambiental decorrente do crescimento do cultivo da cana-de-açúcar, surge a demanda por parte dos gestores do agronegócio a necessidade do monitoramento contínuo do vigor vegetativo das lavouras de maneira tecnologicamente viável para auxiliar a geração de métodos e modelos que possam fornecer informações relacionadas com o potencial produtivo ao longo da safra.

O modelo matemático na agricultura constitui-se em uma ferramenta que permite conhecer quantitativamente a influência das condições climáticas sobre o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura agrícola. No Brasil, a quantificação dos efeitos da variabilidade climática em culturas agrícolas e, conseqüentemente, o impacto sobre a produção é realizada de maneira subjetiva, a safra é estimada a partir de informações baseadas em opiniões de agentes técnicos e econômicos relacionados ao setor agrícola. Tal subjetividade deve-se em parte à dinâmica espaço temporal da atividade agrícola que, aliada a grande extensão territorial brasileira dificulta a obtenção de informações atualizadas e confiáveis (Pino et al., 2001).

Uma variável relevante na estimativa da produtividade agrícola por meio de modelos é o índice de área foliar (IAF), que reflete as condições de crescimento impostas pelo efeito conjunto das variáveis agrometeorológicas e de cultivo, ao longo do ciclo da cultura (Dorayswamy et al., 2004). Como as alterações no IAF são manifestadas na reflectância espectral dos dosséis agrícolas, este índice pode ser estimado para grandes regiões por meio de imagens de Sensoriamento Remoto (Myneni et al., 1997).

Os satélites de observação da Terra vêm operando de forma sistemática nos últimos anos, provendo uma visão sinóptica e freqüente de grandes áreas, a custos baixos. As imagens geradas pelos sensores orbitais têm características que possibilitam o estudo e a análise do ciclo de desenvolvimento de culturas agrícolas (Vicente et al., 2012; Brown et al., 2013).

A utilização do sensoriamento remoto para a estimativa de produção de diferentes culturas vem há anos sendo estudada em diferentes aspectos e muito já contribuiu para o melhor entendimento da produção agrícola, principalmente pela capacidade de obtenção de informações da condição e desenvolvimento da planta em um determinado momento e por possibilitar a cobertura de grandes áreas, em curto espaço de tempo, mesmo à distância.

Estudos mostram que o monitoramento realizado por meio de sensores orbitais tem obtido resultados com divergências não significativas em relação aos dados oficiais como os do IBGE (Mello et al., 2012).

O uso de modelos que possibilitem a utilização de dados de sensoriamento remoto e ainda dados meteorológicos são extremamente importantes, principalmente pelo fato de possibilitar a cobertura de extensas áreas.

Nesse contexto, os objetivos desse estudo foram:

- i) avaliar a resposta da cana-de-açúcar às variáveis agrometeorológicas atuantes no Centro-Oeste;
- ii) estimar a produtividade da cana-de-açúcar a partir de dados biométricos, climáticos e orbitais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CANA-DE-ACÚCAR

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas brasileiras, tendo um papel chave na produção de energias renováveis. Além do etanol, utilizado como combustível, e do açúcar, importante commodity brasileira, a cana-de-açúcar pode ser fonte de biomassa, utilizada atualmente como energia (Waclawosky et al., 2010).

O Brasil é o principal produtor e exportador mundial de cana-de-açúcar. As vendas do setor sucroenergético cresceram 41,1% em julho/2016, comparado a julho/2015, chegando a US\$ 1,17 bilhão. Foi o único setor dentre os cinco principais setores exportadores que teve incremento de valor exportado. Houve elevação tanto na quantidade exportada (+22,3%) como no preço médio de exportação (+15,3%). O açúcar é o principal produto de exportação do setor, sendo responsável por 90,9% (US\$ 1,06 bilhão) das vendas externas do setor. A quantidade exportada de açúcar aumentou 23,8%, chegando a 2,91 milhões de toneladas, enquanto o preço médio de exportação incrementou 18,0%. As vendas de açúcar cresceram em praticamente todos os principais mercados importadores: China (US\$ 104,88 milhões; +176,8%); Argélia (US\$ 38,30 milhões; +110,3%); Emirados Árabes Unidos (US\$ 54,80 milhões; +322,9%) (MAPA, 2016).

A produção de cana-de-açúcar no país estimada para safra 2016/2017 é de 694.544,8 milhões de toneladas. O crescimento está previsto em 4,4% em relação à safra anterior. A área a ser colhida é de 9.110,9 mil hectares, aumento de 5,3% se comparada com a safra 2015/2016 (CONAB, 2016).

Com a crescente demanda, atualmente, por recursos energéticos substituídos do petróleo, a cultura de cana-de-açúcar está em plena expansão no território brasileiro, rumo a regiões de marcante déficit hídrico, como o Cerrado Goiano, o Triângulo Mineiro, o Estado do Mato Grosso do Sul e o oeste do estado de São Paulo (Guimarães, 2011).

Segundo Moraes & Zilberman (2014), a expansão ocorreu principalmente sobre áreas que apresentam condições climáticas e infraestrutura mais adequadas à adaptação da cultura. Fatores como a queda de preços de grãos, câmbio valorizado, elevação da remuneração da cana-de-açúcar e a implantação de novas usinas, no período entre 2004 e 2008, impulsionaram o movimento de transição de culturas, notadamente sobre a região Centro-sul (Silva Neto, 2004; Castro et al., 2010).

Com a expansão de área cultivada com a cultura de cana-de-açúcar no Estado de Goiás, houve um aumento na implantação de novas usinas. Atualmente o Estado possui 34 usinas em operação, duas sendo implantada e três em operação suspensa (Figura 1).

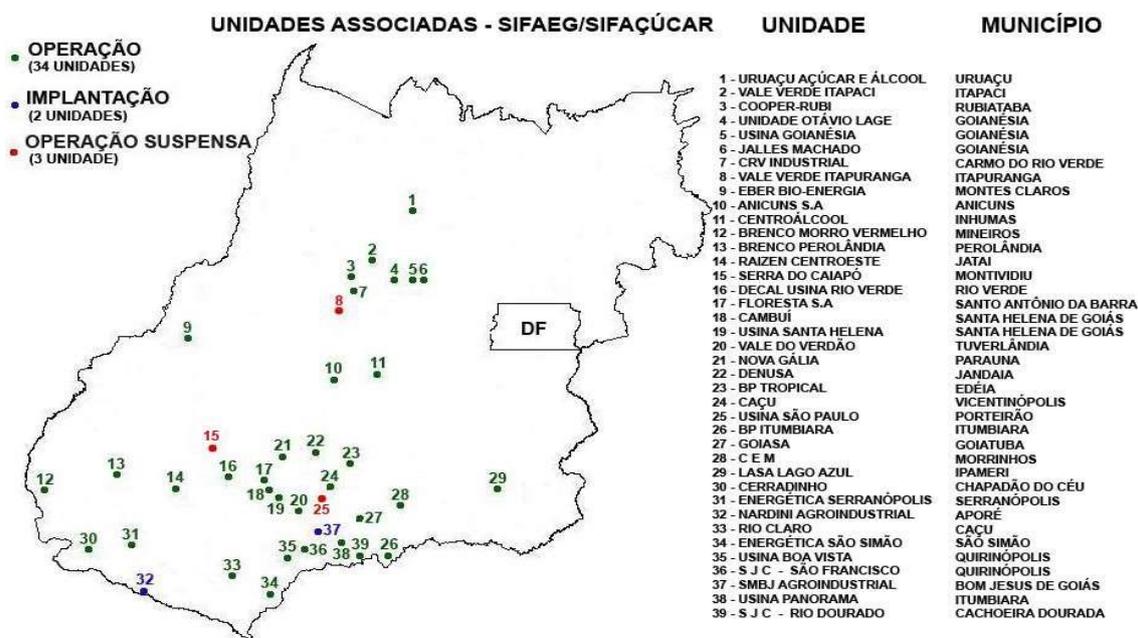


Figura 1. Relação das unidades produtoras de etanol e açúcar do estado de Goiás, associadas ao Sindicato da Indústria de Fabricação de Etanol do Estado de Goiás (SIFAEG) (fonte: SIFAEG, 2016).

Goiás vem ganhando cada vez mais importância, no cenário nacional, no que se refere à cadeia produtiva da cana-de-açúcar, com aumento da área plantada e produção (Tabela 1). Dentre os fatores que favoreceram a implantação da cultura na região de Goiás, destaca-se o clima tropical, com duas estações distintas quanto ao regime hídrico, uma quente e úmida, favorecendo a germinação, o perfilhamento e desenvolvimento vegetativo, e outra com temperaturas mais amena e seca, que favorece a maturação e o acúmulo de sacarose na planta (CONAB, 2016).

Tabela 1.0 Área colhida e produção 2005 – 2017.

Ano	Área colhida (ha)		Produção (t)	
	Brasil	Goiás	Brasil	Goiás
2005/06	5.840,30	202,5	43 1.413,40	15.547,90
2006/07	6.163,30	234,9	474.800,40	18.723,40
2007/08	7.010,20	401,8	571.370,70	29.645,20
2008/09	7.057,90	401,8	571.434,30	29.645,20
2009/10	7.409,50	471,9	604.513,70	40.092,50
2010/11	8.056,10	599,3	623.905,30	46.206,80
2011/12	8.362,60	678,4	560.955,20	45.220,10
2012/13	8.485,00	725,9	588.915,70	52.727,20
2013/14	8.811,40	818,4	658.822,30	62.017,70
2014/15	9.004,50	854,2	634.767,00	66.329,40
2015/06	8.654,80	885,8	665.586,20	73.190,50
2016/17	9.110,90	954,4	694.544,80	68.651,50

Fonte: IBGE – Produção Agrícola Municipal (2017).

A expansão da área plantada de cana-de-açúcar em Goiás é explicada pelas vantagens que o Estado possui em relação a outras unidades da federação. Os custos com a lavoura de cana em Goiás são menores, a colheita é quase toda mecanizada, são realizados altos investimentos em tecnologia, são plantadas variedades mais produtivas, os preços das terras são baixos, comparados com São Paulo, maior produtor brasileiro, além da boa produtividade (83,4 t/ha). Tudo isso torna Goiás atrativo para essa cultura (Marques, 2009).

MORFOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma gramínea tropical perene, que se desenvolve em forma de touceira com perfilhos em sua base com mais de 2,0 m de altura e diâmetro com cerca de 0,05 m (James, 2004). A parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescência e frutos e a subterrânea por raízes e rizomas que são formados por nós da touceira (Mozambani et al., 2006).

Colmo

Os colmos apresentam formato cilíndrico sendo composto por nós e entrenós ou internódios e podem ser definidos como a porção acima do solo, que sustenta as folhas e a inflorescência. Na cana-de-açúcar o colmo é considerado um fruto agrícola, por ser responsável pelo armazenamento da sacarose (Heerden et al., 2010). A parte da cana-de-açúcar de maior valor comercial é o colmo, que se constitui num reservatório, onde em condições favoráveis à maturação, é acumulada grande quantidade de sacarose (Cardozo & Sentelhas, 2013). O seu desenvolvimento é iniciado por meio do surgimento de perfilhos, que está intimamente relacionado ao tempo térmico e ao estresse hídrico (Glasziou et al., 1965; Inman Bamber, 1991).

Folhas

As folhas são responsáveis pela interação da planta com a atmosfera, trocando gases e vapor d'água através dos estômatos que abrem e fecham em função da turgidez das células-guardas. São constituídas de duas partes: bainha que liga a folha ao colmo da planta na base dos nós e a lamina foliar que faz o processo de transpiração vegetal, respiração e fotossíntese, sendo a coletora de energia do meio externo, podendo chegar a 1,50 m de comprimento e 0,10 m de largura sendo uma das partes que diferem as variedades da cana-de-açúcar (James, 2004).

O ciclo de morte e substituição das folhas ocorre durante todo o período de desenvolvimento da cultura, porém o número médio de folhas constante permanece em torno de 9 a 13 folhas vivas por colmo (Van Dillewijn, 1952; Inman Bamber, 1991).

Inflorescência

O florescimento da cana-de-açúcar é indesejável para o manejo, devido ao consumo de energia com perdas no teor de sacarose e a alterações na qualidade da matéria-prima industrial. Para o florescimento são necessárias algumas condições específicas de fotoperíodo, temperatura e umidade.

O florescimento da cana é induzido por um ambiente propício quanto ao fotoperíodo (de 11,5 a 12 horas de luz), temperaturas mínimas noturnas iguais ou superiores

a 18 °C e temperaturas máximas diurnas iguais ou inferiores a 31 °C, dentro do período fotoindutivo. Os mesmos autores destacam ainda que estas temperaturas devem ocorrer pelo menos em dez ciclos indutivos (não necessariamente sucessivos), exigindo-se então tais condições por volta de 10 dias. Além do fotoperíodo e da temperatura do ar, a boa disponibilidade de água no solo também é favorável ao florescimento (Alfonsi et al., 1997).

Raiz

A profundidade do sistema radicular formado depende, principalmente, do cultivar e das condições edáficas como, por exemplo, a umidade e as características físicas e químicas do solo (Fauconnier & Bassereau, 1975). Existem características básicas de raízes na cana-de-açúcar: as raízes superficiais, ramificadas e absorventes; as raízes de fixação mais profundas; e, as raízes-cordão, que podem aprofundar-se até 6 metros. Através de análises em raízes de diversas cultivares, foram definidas três categorias de raízes para cana-de-açúcar: as superficiais, mais finas e com alta capacidade de absorção de água e nutrientes; as raízes de sustentação, que sustentam a planta e podem atingir até 1,5 m de profundidade; e as raízes profundas, que chegam a 6 m de profundidade, as quais têm o papel de abastecer a planta com água das camadas mais profundas nos períodos de intensa estiagem (James, 2004). As raízes da soqueira são mais superficiais que as da cana-planta, logo se verifica que quanto maior o número de cortes, mais superficial fica o sistema radicular das soqueiras (Dillewijn, 1952).

FENOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

De acordo com Gascho & Shin (1983), a cana-de-açúcar apresenta quatro diferentes estádios de desenvolvimento em sua fenologia (Figura 3): brotação e emergência dos brotos (colmos primários); perfilhamento e estabelecimento da cultura (da emergência dos brotos até o final do perfilhamento); período do grande crescimento (do perfilhamento final ao início da acumulação da sacarose), e maturação (intensa acumulação de sacarose nos colmos).

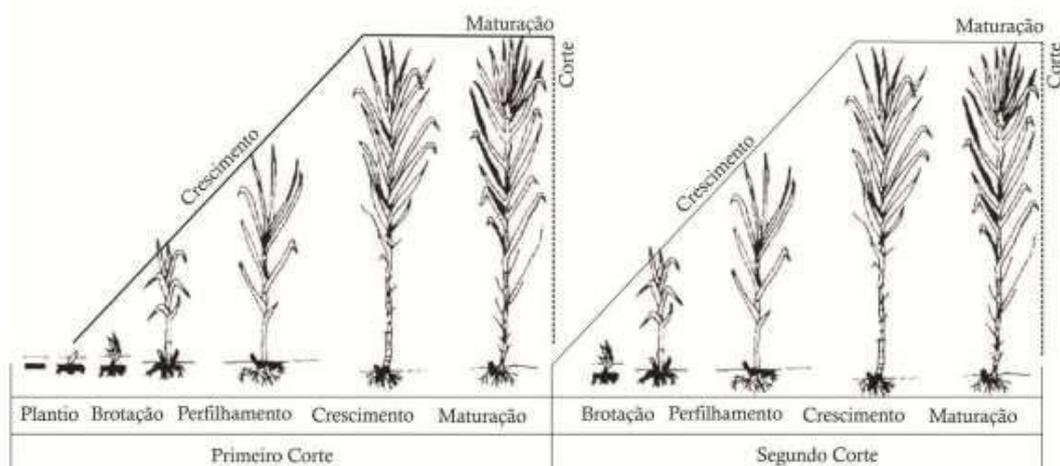


Figura 2.0 Estádio fenológico da cana-de-açúcar.

Fonte: Adaptado. Disponível em www.sugarcane crops.com. Último acesso em 09 de setembro de 2016.

A fase de brotação compreende o período que vai desde o plantio até a brotação das gemas. Sob as condições do solo, a brotação começa de 7 a 10 dias e geralmente dura ao redor de 30-35 dias (Magro et al., 2011). O broto se desenvolve a partir do rompimento das folhas lignificadas da gema e sai pelos poros germinativos desenvolvendo-se em direção à superfície do solo, sendo que logo em seguida, começam a aparecer às primeiras raízes denominadas de raízes de fixação (Ripoli et al., 2007).

O perfilhamento é iniciado a partir de aproximadamente 40 dias após o plantio, e pode atingir o pico em cerca de 3 a 5 meses sob condições favoráveis de precipitação (Oliveira et al., 2004; Silva et al., 2008; Almeida et al., 2008). O perfilhamento é governado inicialmente pela temperatura e radiação, porém também é afetado pela variedade, densidade de plantio, ciclo (cana-planta ou cana-soca) e disponibilidade de água e de nitrogênio no solo. A cana-de-açúcar perfilha nos primeiros meses após o plantio ou a rebrota, e esse perfilhamento intensifica-se à medida que as condições de temperatura e disponibilidade hídrica são favorecidas. Após este período, o número de perfilho diminui até se estabilizar (Suguirani & Matsuoka, 2001).

O estágio de crescimento dos colmos começa a partir de 120 dias após o plantio (DAP), e vai até 270 DAP, em um cultivo de 12 meses. Durante o período anterior, no perfilhamento, ocorre uma estabilização. Do total de perfilho produzidos apenas 40 a 50% sobrevivem até 150 DAP, para formar colmos. Essa é a fase mais importante do cultivo onde acontece a formação e alongamento do colmo e deste modo resultando na produção da cana-de-açúcar (Casagrande, 1991).

O processo de maturação da cana-de-açúcar pode ser definido como o processo fisiológico que envolve a formação de açúcares nas folhas e seu transporte e armazenamento no colmo (Watt et al., 2014). A maturação dos colmos possui duração de 60 a 90 dias.

EXIGÊNCIAS CLIMÁTICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cultura da cana-de-açúcar apresenta particularidades em cada uma de suas fases, as quais podem ser separadas em dois momentos: 1ª Etapa - brotação, perfilhamento e crescimento vegetativo, em que a cultura é exigente em teor de água no solo e alta temperatura do ar; 2ª Etapa – correspondente à fase de maturação, sendo que para a cana-de-açúcar entrar neste subperíodo (reprodutivo), as plantas exigem um período de déficit hídrico e baixas temperaturas, entrando assim em repouso fisiológico, priorizando o acúmulo de sacarose nos colmos, que é a substância de reserva da cana-de-açúcar (Andrade & Cardoso, 2004).

As necessidades hídricas da cana-de-açúcar variam conforme os períodos de crescimento, a cultura necessita em média, de 1.500 a 2.500 mm de chuva, distribuídos de maneira uniforme durante o ciclo. Seu consumo diário de água nas principais regiões produtoras do país, dependendo da variedade, do estágio de desenvolvimento da cultura, da demanda evaporimétrica em função do mês e da região (variação temporal e espacial), em geral tem variado de 2,0 a 6,0 mm dia⁻¹ (Salassier, 2006).

Alguns estudos de consumo hídrico da cana-de-açúcar obtidos em campo, encontrados na literatura, podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2.0 Consumo hídrico da cana-de-açúcar.

Ciclo da cultura	Local	Consumo hídrico (mm d)			Referências
		Mínimo	Médio	Máximo	
Planta	EUA (Havaí)	4,1	5,7	8,6	Campbell et al. (1959)
-	EUA (Havaí)	3,8	-	8	Cox (1960)
Planta	África do Sul	2,3	-	6,1	Thompson et al.(1963)
Planta	África do Sul	1,8	3,7	5,7	Thompson (1965)
-	Brasil	1,3	-	3,4	Tosello (1966)
Planta e soca	Taiwan	2,2	4,8	7,7	Chang e Wang (1968)
Planta	África do Sul	2,5	3,9	6,6	Thompson e Boyce (1971)
-	Brasil	1,2	-	2,8	Cruciani (1972)
Planta	Brasil	2,3	3,6	4,5	Souza (1974)
Planta	Filipinas	1,5	3,1	4,6	Early e Gregório (1974)
Planta	Argentina	3,4	4,4	5,1	Fogliata (1974)
Soca	Brasil	2,2	3,6	5,0	Souza (1975)
1ª Soca	África do Sul	2,5	3,9	7,8	Thompson (1976)
2ª Soca	África do Sul	1,8	3,6	5,9	Thompson (1976)
Planta	Brasil	1,78	3,14	4,5	Souza e Scardura(1977)
Soca	Brasil	2,1	3,25	4,4	Souza e Scardura(1977)
Planta	Brasil	1,9	3,8	5,6	Leme (1978)
Planta	Brasil	1,3	3,2	4,8	Leme (1978)
Planta	Brasil	2,3	3,3	4,5	Scardura (1979)
Soca	Brasil	2,2	3,2	4,4	Scardura (1979)
Planta e soca	EUA (Flórida)	1,3	3,4	6,8	Shin e Gascho (1980)
Planta	Brasil	0,5	2,5	6,0	Barbieri (1981)
Planta	Taiwan	-	2,3	-	Chang et al. (1983)
1ª Soca	Taiwan	-	3,1	-	Chang et al. (1983)
2ª Soca	Taiwan	-	3,1	-	Chang et al. (1983)
Planta	Colômbia	2,7	3,3	3,7	Yang et al (1985)
1ª Soca	Colômbia	3,2	3,6	4,0	Yang et al (1985)
Média	-	2,2	3,6	5,4	-

Fonte: Marin et al. (2009); Teramoto (2003); Suguitani (2006).

Em um experimento implantado simultaneamente de cana-de-açúcar, com a variedade Q96 e Q124, em condições de sequeiro e irrigado, apresentou que até o estágio de rápido crescimento com demanda de $ET_o=156$ mm e $DEF=130$ mm não afetou o acúmulo de biomassa. No estágio de desenvolvimento a ocorrência de déficits hídricos maiores que 120 mm ano^{-1} há uma redução considerável do acúmulo de biomassa (62%) comparada com o tratamento irrigado na fase final do ciclo da cultura e maiores do que 145 mm ano^{-1} tem como consequência a quebra na produção de sacarose de 33% (Inman-Bamber & Smith, 2005; Inman-Bamber, 2004).

A temperatura do ar é um dos fatores de maior importância no crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, tendo influencia em praticamente todo o ciclo da cultura desde a brotação até a maturação. As temperaturas ideais para o cultivo de

cana-de-açúcar situam-se entre 21 °C e 35 °C, em que, sob temperaturas abaixo de 20 °C o crescimento é lento e temperaturas máximas acima de 38 °C tornam-se prejudiciais.

A temperatura ideal para a emergência das gemas está na faixa entre 27 e 32 °C. Por outro lado, temperaturas abaixo de 5 °C e acima de 45 °C tem efeito prejudicial (Casagrande, 1991; Irvine, 1983). De acordo com Liu et al. (1999), a formação e o crescimento dos perfilho são favorecidos pelo aumento da temperatura até os 30 °C e, quando abaixo de 20 °C, pode ocorrer paralisação no crescimento. Almeida et al. (2008) verificaram que temperaturas entre 25 °C e 27 °C, combinadas com suprimento hídrico adequado, favorecem o desenvolvimento de novos perfilho.

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; Dinardo-Miranda 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).

Características climáticas do bioma Cerrado

A quantidade de radiação solar disponível no Cerrado é abundante para o suprimento das reações de fotossíntese, que é a principal responsável pelo potencial de produção de biomassa, logo, outros parâmetros climáticos e fatores edáficos podem estar limitando a expressão do potencial energético. Esse fato explica, em parte, a grande biodiversidade da fauna e da flora do Cerrado. Em termos de média mensal, o Cerrado tem à sua disposição entre 380 cal cm⁻² dia⁻¹ e 620 cal cm⁻² dia⁻¹ de radiação solar global incidente (RG) ao longo do ano. O mês com menor intensidade de RG é junho por causa do maior afastamento angular do Sol em relação ao Hemisfério Sul (solstício de inverno) (EMBRAPA, 2008).

As temperaturas máximas no bioma Cerrado variam entre 24 °C e 33 °C. As mais elevadas acontecem nas estações primavera-verão, com variação térmica entre 24°C e 36 °C. As temperaturas mínimas na área de domínio do Cerrado não são limitantes às culturas, pois a não ser no extremo Sul, onde pode ocorrer à formação de geadas, as demais

regiões não chegam a apresentar temperatura letal para a grande maioria das plantas. As áreas do Cerrado apresentam temperaturas mínimas cujos valores oscilam entre 8 °C e 15 °C nos meses de junho e julho e anuais entre 19 °C e 23 °C (Silva et al., 2008).

No semestre outono–inverno, que coincide com a estação seca em grande parte da área do Cerrado, acontece um decréscimo significativo da umidade relativa do ar, sendo os meses de agosto e setembro os que apresentam os menores índices com valores oscilando entre 40% e 60% (EMBRAPA, 2008).

A precipitação em Goiás possui o regime de 1.500 mm ano⁻¹, apesar da variabilidade inerente, o Cerrado apresenta um padrão de precipitação que se caracteriza por acontecer em dois períodos, um seco e outro chuvoso, que variam no espaço e no tempo dentro da área de domínio do bioma (Assad, 1994).

Balanco hídrico de cultivo

A demanda hídrica de uma lavoura é representada pela evapotranspiração da cultura (ETc). Denomina-se evapotranspiração da cultura quando as medidas da evapotranspiração são feitas sobre uma grande área cultivada, livre de pragas e doenças, bem fertilizada, em ótimas condições de umidade e em pleno desenvolvimento vegetativo. (Iedo, 2011). As medidas diretas do consumo de água pelas culturas são difíceis de serem conduzidas ou não são convenientemente obtidas. Por isso, a determinação da ETc em função dos elementos climáticos apresenta-se como uma técnica simples e prática. Para isso, é necessário primeiro calcular a evapotranspiração de referência (ETo).

A ETo é calculada ou medida sobre a superfície de um cultivo hipotético de grama verde ou alfafa em estado de desenvolvimento ativo, cobrindo completamente o solo, sem deficiência hídrica e livre de pragas e doenças. Assume-se que o cultivo hipotético ou superfície de referência tem altura de 0,12 m, com a resistência da superfície igual a 70 s m⁻¹ e um albedo de 0,23 (Allen et al., 1998). Nessas condições, os valores de ETo que representam o potencial evaporativo da atmosfera numa localidade específica em determinada época do ano, sem levar em conta as características dos cultivos agrícolas e os fatores do solo, são afetados apenas pelos elementos meteorológicos e, conseqüentemente, a mesma é considerada uma variável climática e, portanto, pode ser estimada a partir de dados meteorológicos que servirão para obter um conjunto consistente de dados e coeficientes de cultura (Kc) para serem utilizados na determinação da evapotranspiração de

culturas agrícolas (Sediyama, 1996). A ET_c difere da evapotranspiração de referência principalmente em função da cobertura do solo, das propriedades do dossel vegetativo e da resistência aerodinâmica entre a grama e as culturas, albedo, altura da planta e evaporação do solo (Pires et al., 2001).

Os coeficientes de culturas, normalmente, são obtidos em experimentos científicos através dos quais se eliminam os efeitos de outras variáveis que possam interferir no crescimento e no desenvolvimento das plantas como pragas, doenças, deficiência nutricional. Pois, o K_c é simplesmente uma razão entre a ET_c e a ET_o ($K_c = ET_c / ET_o$). Oboletim FAO 56 (Allen et al. 2006) apresenta uma série de K_c 's tabelados para várias culturas, em suas respectivas fases de desenvolvimento.

O balanço hídrico consiste no somatório das quantidades de água que entram e saem de um elemento de volume de solo e, em dado intervalo de tempo, é a quantidade líquida de água que nele permanece (Reichardt & Timm, 2004). Na escala local, o balanço hídrico permite estabelecer a variação de armazenamento de água no solo e, portanto, a quantidade disponível para a cultura, em intervalos de tempo, permitindo conhecer os déficits e os excedentes hídricos (Sentelhas & Angelocci, 2007).

Um dos métodos mais utilizados para calcular o balanço hídrico é o de Thornthwaite & Mather (1955). Este método requer basicamente dados de evapotranspiração potencial ou de referência (ETP ou ET_o), coeficiente da cultura (K_c) ao longo do período de desenvolvimento, precipitação (P) e a capacidade de água disponível (CAD) para o período considerado. O termo evapotranspiração foi introduzido por Thornthwaite na década de 40 para expressar o processo de transferência simultâneo da evaporação da água do solo e da transpiração das plantas numa superfície vegetada (Pereira et al., 2002).

MODELOS DE ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE

Um modelo é definido como a representação matemática de um sistema ou um processo, enquanto que modelagem é o processo de desenvolvimento dessa representação (De Wit, 1978). Segundo Monteith (1996), os modelos de simulação de cultura podem ser definidos com um conjunto de equações para estimar o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura a partir de uma série de coeficientes genéticos e variáveis ambientais. Thorley & Johnson (2000) afirmam que modelos matemáticos podem contribuir com o aumento do conhecimento e auxílio a aplicações práticas na agricultura.

Para desenvolver os modelos de previsão de produtividade, há necessidade de considerar quatro fatores principais que afetam a produtividade final: clima, cultura, solo e sistemas de manejo. Dentre as variáveis climáticas destacam-se a precipitação pluvial, a radiação solar global incidente, a temperatura do ar, a velocidade do vento e a umidade relativa do ar. Nas culturas, as variáveis envolvem o código genético de uma variedade específica, as taxas de fotossíntese e transpiração, o Índice de área foliar (IAF) e ciclo fenológico, bem como a produtividade potencial, a resistência aos estresses promovidos pelo ambiente, e pelas doenças e pragas. No solo devem ser observados a água disponível, a estrutura, a textura e a fertilidade do solo (Liu, 2002). Os sistemas de manejo das culturas incluem as práticas de conservação de solo e água, fertilização, controles de doenças e pragas e sistemas de plantio (Liu, 2002).

Atualmente, os métodos incluem previsão do tempo, observação das condições do crescimento das culturas em campo, modelos estatísticos agroclimatológicos, modelos de simulação de processos fisiológicos, modelos de produtividade primária e modelos de índices de vegetação via satélite. Embora o método mais adequado seja o da observação diária das condições do crescimento em campo, seu custo operacional é alto. Além disso, os dados assim coletados pelos observadores são passíveis de erros em função dos desvios causados pela estimativa individual, que, de algum modo, é subjetiva (Liu, 2000).

Os modelos de simulação dos processos fisiológicos vêm sendo desenvolvidos há algum tempo (De Witt, 1958). Esses modelos são fundamentados na simulação da taxa diária de fotossíntese, que converte a energia solar em matéria seca, e na simulação dos efeitos do estresse hídrico, por meio do balanço hídrico e das práticas de manejo de culturas.

O modelo DSSAT/Canegro, baseado no modelo Ceres-Maize (Jones et al., 1986), foi desenvolvido na África do Sul para modelar os processos fisiológicos mais relevantes da indústria açucareira sul-africana (Inman-Bamber, 1991). Incluído no conjunto de modelos “decision support system for agrotechnology transfer” (DSSAT versão 3.1) (Inman-Bamber & Kiker, 1997) e atualizado na versão 4.5 do DSSAT (Singels et al., 2008), o DSSAT/Canegro vem sendo aplicado em diversas regiões do mundo para análise e avanço no conhecimento dos sistemas de produção de cana-de-açúcar (Inman-Bamber, 1994; Singels & Bezuidenhout, 2002; Knox et al., 2010; Singels et al., 2010; Marin et al., 2011). Nassif et al. (2012) avaliou o modelo DSSAT/Canegro em Padrópolis-SP em latossolo vermelho eutroférico, de textura argilosa, a variedade CTC 4 apresentou boa correlação

com os dados validados e geraram valores de R^2 próximos a 1 como altura 0,96, perfíhos 0,89, índice de área foliar 0,98, sacarose 0,81 e folhas verdes 0,94.

O AquaCrop prediz a produtividade das culturas, a necessidade de água e a eficiência do uso da água, sob condições limitantes de déficit hídrico (Raes et al., 2009). Alencar, 2014 observa-se que o modelo AquaCrop apresentou um bom ajuste aos dados observados com boa precisão ($r^2=0,92$), explicando 92% da variabilidade dos dados observados em experimentos de campo. O modelo subestimou os valores entre 120 e 230 DAC, superestimando a biomassa no final do ciclo, apresentando erro de 3,43 t ha⁻¹ e um erro de estimativa final da biomassa de 8,2%.

Um modelo denominado Crop-Environment Resource Synthesis (CERES), desenvolvido no Laboratório de Solo e Água em Terreno de Pastagem (Grassland Soil and Water Laboratory) (Jones et al., 1986), foi aplicado para estimativa de produtividade do milho nos Estados Unidos com resultados promissores, indicando sua potencialidade na previsão de safra em grande escala (Hodges et al., 1987). Esse modelo também foi aplicado e avaliado para as culturas de milho (Liu; B.W; Liu, 1989) e de trigo (Aunciação; Liu, 1991) no Brasil com resultados satisfatórios. Os modelos de processos fisiológicos, que simulam o crescimento e o desenvolvimento de uma cultura específica, têm suas bases fisiológicas e físicas.

O modelo de crescimento Q-CANE é o resultado de um projeto iniciado na Austrália, para estudo dos processos ecofisiológicos da cana-de-açúcar em base diária, os quais estão relacionados com o desenvolvimento fenológico e as condições ambientais do local de cultivo. Esses processos são representados por módulos que consideram o desenvolvimento do dossel, fotossíntese, respiração e partição de carboidratos para os órgãos das partes de crescimento e respiração (Liu, 2001).

O Método da Zona Agroecológica (ZAE), desenvolvido por Kassam (Fischer et al., 2002; Doorenbos & Kassam, 1979), sendo uma forma muito precisa para a estimativa da produtividade potencial das culturas em função do clima (Tubiello et al., 2007). Além disso, esta produtividade potencial pode ser penalizada pelo déficit hídrico, de vez que este modelo é capaz de estimar a produtividade real com alta precisão (Gouvêa et al., 2009; Marin et al., 2008).

Picoli (2006) e Sugawara et al. (2007) estimaram a produtividade da cana-de-açúcar por meio de variáveis agrometeorológicas e espectrais utilizando dados do satélite Landsat, com abrangência local. Picoli et al. (2009) utilizaram o sensor MODIS na

estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, também com abrangência local. Esses trabalhos, dentre outros, demonstraram o potencial do uso de dados provenientes de sensores a bordo de plataformas orbitais (satélites) para a estimativa de produtividade de culturas agrícolas.

SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos, sendo que essas atividades envolvem a detecção, aquisição e a análise (interpretação e extração de informações) da radiação eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos (Moraes, 2006).

Mendes & Cirilo (2013) apontaram diversas vantagens inerente às técnicas de Sensoriamento Remoto: (1) aquisição de dados espacializados em lugar de observações pontuais; (2) obtenção de dados sobre a superfície terrestre em grandes extensões e (3) agilização, maior precisão e menor custo em levantamentos de campo.

As imagens de satélite representam importante fonte de informação para o propósito de conhecer a distribuição espacial da superfície terrestre, das formações vegetais que a compõem, bem como as alterações que vem ocorrendo ao longo do tempo. Atualmente, há uma gama de satélites orbitais disponíveis oferecendo diversos produtos destinados ao mapeamento e monitoramento ambiental e agrícola e dos padrões de vegetação, incluindo a estimativa de produtividade de culturas (Picoli, 2006; Sugawara et al., 2007; Picoli et al., 2009).

A tecnologia de sensoriamento remoto tem grande potencialidade ao ser aplicado no setor agrícola. Através de sensores e sistemas integrados é possível obter diversas informações como: estimativa de área plantada – através das imagens consegue-se estimar toda a extensão da plantação, podendo controlar e acompanhar o crescimento da área plantada. Várias técnicas são usadas para estimar áreas plantadas fundamentadas nas imagens de satélite, incluindo estimativa direta de uma determinada classe na imagem classificada pela técnica de classificação supervisionada, estimativa de área pela interpretação visual das fotografias áreas e imagens via satélite, estimativa direta e inversa

da área usando as matrizes confusa, regressão linear simples e regressão linear múltipla (Gallego & Delince, 1995b).

Smith & Fuller (2001) utilizaram uma base cartográfica de uso de solo gerado com SIG para classificar 21 tipos de uso do solo utilizando dados de satélite. Concluíram que a criação de um banco de dados pelo SIG facilita a identificação e a estimativa de área ocupadas pelos 21 tipos de uso do solo com uma acurácia variando de 84% a 95%

Detecção de pragas na plantação e gargalos no processo produtivo: quando os fitopatógenos infectam plantas, a absorção da luz incidente apresenta mudanças no intervalo da região do visível e do infravermelho. Este acontecimento é devido, provavelmente, a diminuição do teor de clorofila, alterações em outros pigmentos e na estrutura interna da folha. A mudança na absorção da luz incidente, conseqüentemente, influencia a reflectância de plantas infectadas. Doenças de plantas, em alguns casos, diminuem o teor de clorofila, e a absorção da radiação solar incidente na planta doente, resulta em uma diminuição na região do visível e conseqüentemente a reflectância geralmente é maior na faixa do visível. A alta reflectância das plantas verdes na faixa do infravermelho próximo é, principalmente, devido a estrutura interna das folhas. Plantas doentes também podem apresentar diferentes graus de alterações que levam a uma diminuição da reflectância espectral na faixa do infravermelho próximo (Naue, et al., 2011). Diante deste conhecimento, Zhang et al., (2003) utilizaram imagens hiperespectrais para detecção da requeima do tomateiro (*Lycopersicon esculentum*) em grandes áreas de plantio de tomate. Os autores relataram que esta doença foi diagnosticada pelo sensoriamento remoto hiperespectral e que a região que melhor proporcionou o diagnóstico foi a do infravermelho próximo, devido ao fato desta doença alterar a estrutura interna da folha e devastar rapidamente lavouras de tomate.

Apan et al. (2004) verificaram que áreas de cana-de-açúcar infectadas com ferrugem alaranjada apresentaram diferenças em sua resposta espectral podendo ser discriminada de áreas não contaminadas em determinados comprimentos de onda. Segundo os mesmos autores as bandas que permitiram uma maior discriminação estavam localizadas na região do infravermelho próximo entre 750 nm a 880 nm e 1070 nm. As regiões afetadas pela doença tiveram a reflectância diminuída principalmente na região espectral do verde e do infravermelho próximo.

Lausch et al. (2015), para caracterizar os estágios fenológicos da cevada utilizaram índices de vegetação, parâmetros relacionados com a fenologia e imagens hiperespectrais. Os autores consideraram que o uso de imagens hiperespectrais foi

importante para registrar o desenvolvimento da planta permitindo quantificar as mudanças ocorridas em cada fase sendo fundamental na modelagem ecológica.

Atualmente o uso de VANT na agricultura de precisão para o monitoramento aéreo das plantações é largamente utilizado, por ser mais acessível e flexível quando comparado as tecnologias clássicas. Na literatura podem ser encontrados vários estudos que utilizaram VANT na área agrícola com sucesso. Alguns exemplos como no mapeamento do vigor da plantação (Primiciero et al., 2012); extração de índices de vegetação a partir de imagens obtidas por VANT (Zarco-Tejada et al., 2008); monitoramento de culturas como trigo (Lelong et al., 2008, Hunt et al., 2010), milho e soja (Hunt et al., 2010); mapeamento de plantas daninhas, falhas na irrigação e fertilização, e identificação de áreas com frutos em estágio de maturação (Herwitz et al., 2004); inventário de caracterização, detecção de estresse (Ehsani et al., 2012) e detecção de mudanças (Xiang & Tian, 2011).

Índices de vegetação

Os objetos da superfície terrestre, como os encontrados no ambiente agrícola (vegetação e solo), refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética (REM) em proporções que variam com o comprimento de onda, de acordo com suas características biofísicas e químicas (Florenzano, 2011). Conforme Liu (2006) e Ponzoni & Shimabukuro (2010), a assinatura espectral das plantas, ou seja, o seu comportamento ao longo do espectro eletromagnético, é bem característico. Dependendo da estrutura da folha e da espécie de planta, as energias refletidas, absorvidas e transmitidas são diferentes (Liu, 2015). O estudo da interação entre a radiação eletromagnética e a vegetação trata principalmente da reflectância, que é a propriedade de um determinado objeto refletir a radiação sobre ele incidente (Ponzoni et al., 2012).

O padrão ou comportamento espectral da vegetação é único (em relação a outros alvos naturais) e dinâmico, pois apresenta, além do seu padrão de resposta espectral, também a característica temporal destes alvos, associada à fenologia das culturas ao longo do seu ciclo. Assim, o sensoriamento remoto permite estender às análises da vegetação em diferentes escalas temporais e espaciais dadas a natureza contínua dos dados espectrais no tempo, desenvolvendo estudos sobre o comportamento sazonal e mudanças da composição biofísica e bioquímica de dosséis (Stone et al., 1994; Mora & Iverson, 1997; Jin & Sader, 2005).

Segundo Streit et al. (2005), a planta só utiliza uma parte da REM no processo de fotossíntese, que é conhecida como radiação fotossinteticamente ativa (RFA, ou PAR, do inglês *Photosynthetically Active Radiation*). A RFA compreende a faixa espectral da radiação solar de comprimento de onda de 400 a 700 nm (Monteith, 1972), e está diretamente associada à produção de biomassa e ao crescimento de plantas; sendo essencial no cálculo da área foliar do dossel vegetativo de culturas.

O intervalo entre 400-700 nm corresponde à região espectral do visível, e juntamente com a região do infravermelho próximo (700-1300 nm) são as mais utilizadas na configuração de sensores para imageamento da vegetação terrestre (Meneses, 2012b; Liu, 2006; Novo, 2010). O comportamento da planta na região do visível, quando suas funções fotossintéticas estão em funcionamento normal, é o de alta absorção da REM (Ponzoni & Shimabukuro, 2010), devido à absorção da energia pelos pigmentos fotossintetizantes (e.g. clorofilas). No entanto, essa absorção não é uniforme, conforme pode ser observado na Figura 4. A região do azul (400-500 nm) e do vermelho (600-700 nm) são as faixas em que a planta absorve mais a REM, pois as clorofilas (*a* e *b*) absorvem exatamente nessa parte do espectro. Em contraste, no infravermelho próximo a planta reflete muita REM, pois nessa região o comportamento espectral das plantas é regido pela estrutura interna das folhas.

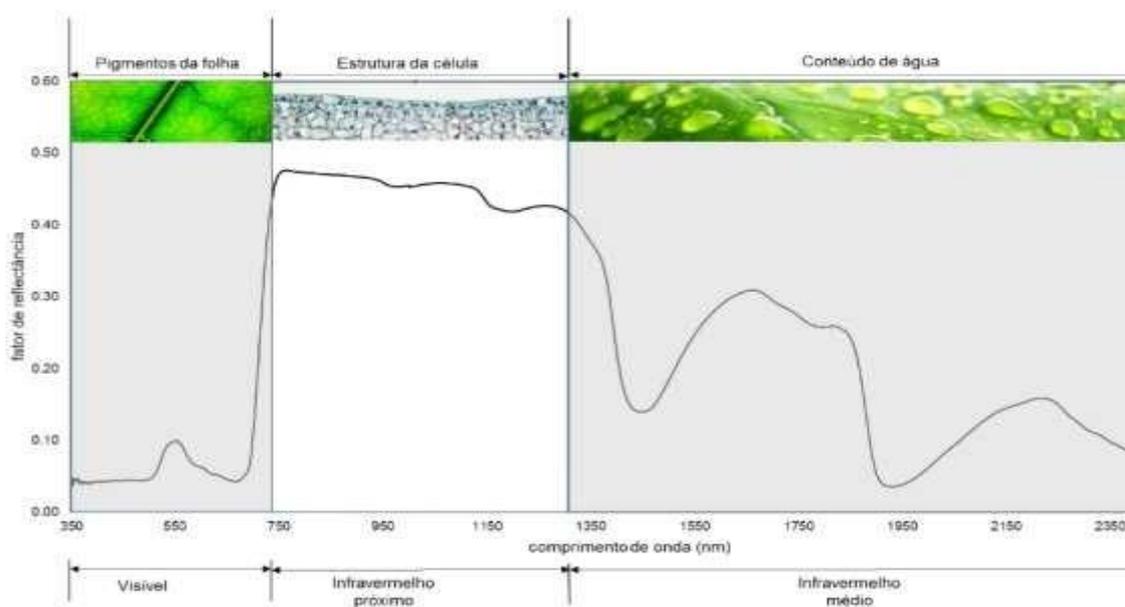


Figura 3.0 Curva de fator de reflectância típica de uma folha verde (Adaptado de Novo, 2010).

Com o intuito de diminuir a quantidade de dados a serem analisados e tornar mais eficiente a extração de informações espectrais, desenvolveram-se os Índices de Vegetação (IVs), que são combinações lineares de bandas espectrais.

O índice *Normalized Difference Index Vegetation* ((NDVI) foi proposto por Rouse et al. (1973) e é calculado pela diferença entre o infravermelho próximo e o vermelho dividido pela sua soma. A utilidade do NDVI foi demonstrada em diversos campos, tais como, agricultura de precisão, estudo da fenologia da vegetação, em classificações espectrais e avaliações primárias de produtividades (Miura et al., 2001).

A maioria dos métodos de identificação do tipo de cultura utiliza a análise do perfil espectro-temporal dos índices de vegetação, tais como o NDVI e o EVI (Huete et al., 1997) correspondente ao período do ciclo fenológico da cultura. Geralmente, uma determinada cultura tem seu ciclo fenológico e seus estádios de desenvolvimento diferentes do que outras culturas. Culturas perenes (e.g. café e laranja) permanecem no campo por vários anos, culturas semiperenes possuem ciclo entre 12-24 meses (cana-de-açúcar e mandioca), e culturas anuais são de ciclo curto, 3 a 6 meses (e.g. soja, milho). Essas diferenças podem ser usadas para distinguir diferentes tipos de culturas pela comparação das curvas de índice de vegetação.

Na literatura existem inúmeros trabalhos que demonstram que os dados de NDVI podem ser usados para monitoramento das condições do crescimento e das safras agrícolas com resultados promissores. Citam-se alguns exemplos: estimativas de biomassa (Prince, 1991a; Hunt, 1994), índice de área foliar (Price & Bauch, 1995) e radiação fotossintética ativa (Frouin & Pinker, 1995), identificação das fases de desenvolvimento fisiológico da cultura (Kauth & Thomas, 2001; Dusek & Musick, 1986) e estimativa de produtividade em escala regional e global (Johnson et al., 1987; Gallo & Flesch, 1989; Wiegand & Richardson, 1987; Prince, 1991b; Bouman, 1995; Liu; Kogan, 2002). Ashcroft et al. (1990) mostraram que os dados de NDVI, obtidos com radiômetros em campo sem interferências atmosféricas, permitem a estimativa de produtividade com uma boa acurácia. Wiegand & Richardson (1990a) demonstraram que o uso dos dados de NDVI obtidos com os dados de Landsat MSS na estimativa da produtividade agrícola é viável. Especialmente a estimativa da produtividade visando efeitos das variabilidades espaciais de solo, a precipitação, até o sistema de manejo, que em outros métodos são incompatíveis (Moran et al., 1997).

Dados espectrais

As imagens de satélite representam importante fonte de informação para o propósito de conhecer a distribuição espacial da superfície terrestre, das formações vegetais que a compõem, bem como as alterações que vem ocorrendo ao longo do tempo. Atualmente, há uma gama de satélites orbitais disponíveis oferecendo diversos produtos destinados ao mapeamento e monitoramento ambiental e dos padrões de vegetação.

O programa Landsat (Land Remote Sensing Satellite) foi desenvolvido pela NASA (Nacional Aeronautics and Space Administration) no final da década de 60, objetivando coletar dados sobre os recursos naturais renováveis e não renováveis da superfície terrestre. O programa Landsat contou com o lançamento de 8 satélites. Atualmente, encontram-se em operação o Landsat-7 (em condições precárias) e o Landsat-8, este último, o mais moderno da família Landsat (USGS, 2013). Em fevereiro de 2013 foi lançado o Landsat 8. Dentre as mudanças contidas neste novo sensor estão dois novos sensores: o sensor espectral OLI (Operacional Land Imager) e o sensor termal TIRS (Thermal Infrared Sensor) (USGS, 2013). Além disto, foram adicionadas duas bandas espectrais, a new coastal (banda 1), projetada especificamente para os recursos hídricos e investigação da zona costeira, e um novo canal de infravermelho, o Cirrus (banda 9), para a detecção de nuvens cirros (Kalaf et.al., 2013). Tais adições provocaram mudanças nos intervalos dentro do espectro dos canais de todas as bandas (USGS, 2013).

Tabela 3.0 Características espectrais das bandas dos sensores a bordo da plataforma Landsat-8. Fonte: USGS (2017).

Satélite LANDSAT-8	
Características	Operacional Land Imager (OLI) Bandas 1 a 9 e Thermal Infrared Sensor (TIRS) Bandas 10 e 11
Largura de Faixa	170x185 km
Bandas	Banda 1 Visível Ultra-Azul (0.43 - 0.45 μ) - 30 m Banda 2 - Visível Azul (0.45 - 0.51 μ) - 30 m Banda 3 - Visível Verde (0.53 - 0.59 μ) - 30 m Banda 4 - Visível Vermelho (0.64 - 0.67 μ) - 30 m Banda 5 - Infravermelho Próximo (NIR) (0.85 - 0.88 μ) 30 m
Espectrais/Resolução	Banda 6 - Infravermelho Médio/SWIR 1 (1.57 - 1.65 μ) 30 m Banda 7 - Infravermelho Médio/SWIR 2 (2.11 - 2.29 μ) 30 m Banda 8 - Pancromática (0.50 - 0.68 μ) 15 m Banda 9 - Cirrus (1.36 - 1.38 μ) 30 m Banda 10 - Infravermelho Termal (TIRS) 1 (10.60 - 11.19 μ) 100 m Banda 11 - Infravermelho Termal (TIRS) 2 (11.50 - 12.51 μ) 100 m
Espacial	Banda 11 - Infravermelho Termal (TIRS) 2 (11.50 - 12.51 μ) 100 m
Resolução Radiométrica	16 Bits
Projeção	Projeção UTM, Datum WGS 1984
Revisita	16 dias
Órbita	Heliossíncrona (altitude de 705 km)

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L. P. **Parametrização e validação do modelo AQUACROP para a cultura da cana-de-açúcar**. 2014. 368 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2014.
- ALFONSI, R. R.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1997. v. 1, p. 52-45.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, J. **Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estudio Riego e Drenaje Paper, 56).
- ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S. B.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. F. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.
- ANDRADE, A. L. B.; CARDOSO, M. B. **Cultura da cana-de-açúcar**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 45 p.
- ANUNCIACAO, Y. M.; LIU, W. T. Estimativa da produtividade de trigo em campo experimental utilizando o modelo fisiológico CERES-MAIZE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 07, 1991, Viçosa. **Resumos...** Viçosa, 1991. p. 22-35.
- APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J. Detecting sugarcane ‘orange rust’ disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**. v.25, n.2, 2004, p. 489-498.
- ASHCROFT, P. M.; CATT, J. A.; CURRAN, P. J.; MUNDEN, J.; WEBSTER, R. The relation between reflected radiation and yield on the broad balk winter wheat experiment. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 2, n. 10, p. 1821-1836, 1990.
- ASSAD, E.; SANO, E.E.; MASUTOMO, R.; CASTRO, L. H. R.; SILVA, F. A. M. Veranicos na região dos cerrados brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência. In: ASSAD, E. (Org.). **Chuvos nos cerrados: análise e espacialização**. Brasília: EMBRAPA-CPAC, p. 43-48, 1994.
- BONNETT, G. D.; HEWITT, M. L.; GLASSOP, D. Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 57, n. 10, p. 1087-1095, 2006.
- BOUMAN, B. A. M. Crop modeling and remote sensing for yield prediction. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, local, v. 43, n. 2, p. 143-161, 1995.

BROWN, J. C.; KASTENS, J. H.; COUTINHO, A. C.; VICTORIA, D. C.; BISHOP, C. R. Classifying multiyear agricultural land use data from Mato Grosso using time-series MODIS vegetation index data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 130, s/n, p. 39-50, 2013.

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.

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

CASTRO, S. S.; KLAUS, A.; SILVA, A. A.; BORGES, V. M. S. A expansão da cana-de-açúcar no cerrado e no estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 1, p. 171-191, 2010.

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 spp.*) em regiões com déficit hídrico. **Nucleus**, Edição Especial, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar**, terceiro levantamento, dezembro/2015. Brasília, 2016. 70 p.

DE WITT, C. T. **Transpiration and crop yield**. Institute of Biology and Chemistry Resources on Field Crops and Herbage, Wageningen, the Netherlands, Landbouwk, Onderz, 1958, 88 p.

DILLEWIJN, C. V. Botany of sugarcane. **Waltham: Chronica Botânica**; New York: Stechert-Hafner, 1952. 371 p.

DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônômico. 2008. 882p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979. 172 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33.

DORAISWAMY, P. C.; HATFIELD, J. L.; JACKSON, B.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.; STERN, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, n. 4, p. 548-559, 2004.

DUSEK, D. A.; MUSICK, J.T. Spectral vegetation indices for estimating corn, sorghum and wheat growth parameters. **American Society of Agriculture Engineering**, s/v., n. 3375, 17 p., 1986.

EHSANI, R.; SANKARAN, S.; MAJA, J. M.; CAMARGO NETO, J. Affordable multi-rotor remote sensing plataforma for applications in precision horticulture. **In: 11 th International Conference Precision Agriculture**, july 15-18, 2012, Indianapolis.

FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azucar**. Barcelona: Blume, 1975. 433 p.

FISCHER, G.; VAN VELTHUIZEN, H.; SHAH, M.; NACHTERGAELE, F. O. **Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: Methodology and results**. Laxenburg: IIASA Research Report, 2002. 155 p.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Textos. 2011. 128 p.

FROUIN, R.; PINKER, R. Estimating photosynthetically active radiation (PAR) at the Earth's surface from satellite observations. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 51, s/n, p. 98-107, 1995.

GALLO, K. P.; FLESH, T. K. Large-area crop monitoring with the NOAA AVHRR data: Estimating the silking stage of corn development. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 27, s/n, p. 73-80, 1989.

GALLENCO, J.; DELINCÉ, J. Regression estimates with remote sensing. Special Report: the MARS Project, Action 1: Regional Inventories. European Community Commission, **ISPRA**, Italy, p.37-43, 1995b.

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

GLASZIOU, K. T.; BULL, T. A.; HATCH, M. D.; WHITEMAN, P. C. Physiology of sugarcane VII. Effects of temperature, photoperiod, and diurnal and season temperature changes on growth and ripening. **Australian Journal of Biological Science**, Melbourne, v. 18, s/n., p. 53-66, 1965.

GOUVÊA, J. R. F.; SENTELHAS, P. C.; GAZZOLA, S. T.; SANTOS, M. C. Climate changes and technological advances: Impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 5, p. 593-605, 2009.

GUIMARÃES, A. C. R. **Caracterização de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas a déficit hídrico**. 2011. 66 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

HEERDEN, P. D. R. V.; DONALDSON, R. A.; WATT, D. A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, n. 11, p. 2877-2887, 2010.

HERWITZ, S.R.; JOHNSON, L. F.; DUNAGAN, S. E.; HIGGINS, R. G.; SULLIVAN, D. V.; ZHENG, J.; LOBITZ, B. M.; LEUNG, J. G.; GALLMEYER, B. A.; AOYAGI, M.; SLYE, R. E.; BRASS, J. A. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. **Computers and electronics in Agriculture**, n. 44, 2004, p.49-61.

HUETE A, DIDAN K, MIURA T, RODRIGUEZ P, GAO X & FERREIRA LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, 83: 195–213.

HODGES, T.; BOTNER, D.; SAKAMOTO, C.; HANG, J. Using the CERES-Maize model to estimate production for the U.S. Cornbelt. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 40, n. 4, p. 293-303, 1987.

HUNT, E. R. JR. Relationship between Woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 15, n. 8, p. 1725-1730, 1994.

HUNT JR., E. R.; HIVELY, W. D.; FUJIKAWA, S. J.; LINDEN, D. S.; DAUGHTRY, C. S. T; MCCARTY, G. W. Acquisition of NIR-Green-Blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. **Remote Sensing**, n. 2, 2010, p. 290-305.

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

INMAN-BAMBER, N.G. DSSAT/CANEGRO: its history, conceptual basis, present and future uses. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints**. Brisbane: University of Queensland, 1994. p.31-34.

INMAN-BAMBER, N., G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. N. Water relations in sugarcane and response to water deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; KIKER, G. DSSAT/CANEGRO 3.10:DSSAT version 3.1. Honolulu: University of Hawaii, 1997.

IRVINE, J. E. Sugarcane. In: SYMPOSIUM ON POTENTIAL PRODUCTIVITY OF FIELD CROPS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS, 1983, International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1983. Proceedings. Los Baños: IRRI, p.361-381, 1983.

JAMES, G. **Sugarcane**. 2. ed. Oxford: Blackwell, 2004. 216 p.

- JIN, S.; SADER, S. A. MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 99, n. 4, p. 462-470, 2005.
- JOHNSON, G. E.; VAN DIJK, A.; SAKAMOTO, C. M. The use of AVHRR data in operation agricultural assessment in Africa. **Geocartography International**, v. 2, n. 1, p. 41-60, 1987.
- JONES, C. A.; KINIRY, J. R.; DYKE, P. T. CERES-Maize: a simulation model for maize growth and development. **A & M University Press**, College Station, TX, USA, 1986.
- KALAF, R.; BRASILEIRO, R.; CARDOSO, P. V. E CRUZ, C. B. M. Landsat 8: Avanços para mapeamento em mesoescala. In: 4º **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO**, 2013, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2ª JGEOTEC - Jornada de Geotecnologias, 2013.
- KAUTH, R. J.; THOMAS, G. S. The tasselled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agriculture crops as seen by LANDSAT. In: SYMPOSIUM ON 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, p. 181-211, 2001.
- KNOX, J.W.; RODRÍGUEZ DÍAZ, J.A.; NIXON, D.J.; MKHWANAZI, M. Apreliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. **Agricultural Systems**, v.103, p.63-72, 2010.
- LAUSCH, A.; SALBACH, C.; SCHMIDT, A.; DOKTOR, D.; MERBACH, I.; PAUSEM M. DERIVING phenology of barley with imaging hyperspectral remote sensing. **Ecological Modelling**, n. 295, 2015, p. 123-135.
- LELONG, C. C. D.; BURGER, P.; JUBELIN, G.; ROUX, B.; LABBÉ, S.; BARET, F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. **Sensors**, n.8, 2008, p. 3557-3585.
- LIU, W. T.; BOTNER, D. M.; SAKAMOTO, C. M. Application of CERES-maize model to yield prediction of a Brazilia-maize Hybrid. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 45, s/n., p. 299-312, 1989.
- LIU, D. L.; KINGSTON, G.; BULL, T. A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including sub optimum and supra-optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 90, s/n., p. 119-139, 1999.
- LIU, W. T.; KOGAN, F. N. Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation condition index. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 23, n. 6, p. 1161-1171, 2002.
- LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2006. 908 p.

MELLO, M.P.; AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B.F.T.; PEBESMA, E.; JONES, J.; SANTOS, N.C.P. Spatial statistic to asses remote sensing acreage estimates: an analysis of sugarcane in São Paulo State, Brazil. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013, **Anais...** IEEE International, 2013, p.4233-4236.

MAGRO, F. J.; TAKAO, G.; CAMARGO, P. E.; TAKAMATSU, S. Y. **Biometria em cana-de-açúcar**. Produção de Cana-de-Açúcar, USP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011, 18 p.

MARIN, F. R.; CARVALHO, G. L.; ASSAD, E. D. Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 a 2005/2006. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16, 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Editora Sete Lagoas, 2009. p. 54-59.

MARIN, F. R.; LOPES-ASSAD, M. L.; ASSAD, E. D.; VIAN, C. E.; SANTOS, M. C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1449-1455, 2008.

MARQUES, D. M. F.; SILVA, T. C. M. da; ZOPELARI, A. L. M. S.; FIGUEIREDO, R. S. Produção e preço da cana-de-açúcar em Goiás. **Conjuntura Econômica Goiana**, n.23, p. 32-43, dez. 2012.

MARQUES, P. V. (Coord.) Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008. Piracicaba: ESALQ/USP, 2009. 194 p. Relatório apresentado a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil –CNA.

MELLO, M.P. Object based image analysis and data mining applied to a remotely sensed Landsat time-series to map sugarcane over large areas. **Remote Sensing of Environment**, v.123, p.553-562, 2012.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos**: princípios, integração e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2013. 572 p.

MENESES, P. R. Sensores imageadores multiespectrais na faixa óptica (0,45-2,5 μm). In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: UnB, 2012. p. 34-46.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). Secretaria de Relações Internacionais do Agronegócio. **Intercâmbio comercial do Agronegócio**: principais mercados de destino. Brasília: MAPA/ACS, 2016. 459 p.

MIURA, T.; HUETE, A. R.; YOSHIOKA, H.; HOLBEN, B. N. An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 78, n. 3, p. 284-298, 2001.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, p.747-766, 1972.

MONTEITH, J. The quest balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 695-697, 1996.

MORA, F.; IVERSON, L. R. Dynamic stratification of the landscape of Mexico: analysis of vegetation patterns observed with multitemporal remotely sensed images. **Geocarto International**, v. 12, n. 2, p. 73-87, 1997.

MORAES, M. A. F. D.; ZILBERMAN, D. **Production of ethanol from sugarcane in Brazil**. Londres: Springer, 2014. 221 p.

MORAES, E. C. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São Paulo: INPE, 2006.

MORAN, M. S.; INOUE, Y.; BARNES, E. M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61, s/n., p. 319-346, 1997.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar, In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 11-18.

MYNENI, R. B.; RAMAKRISHNA, R.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 6, p.1380-1393, 1997.

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

NAUE, C. R.; MARQUES, M. W; LIMA, N. B; GALVÍNCIO, J. D. Sensoriamento remoto como ferramenta aos estudos de doença de plantas agrícolas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 3, p. 190-195, 2010.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2010, 387 p.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; ZUFFELATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S.; SILVA, D. K. T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no estado do Paraná. **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 5, n. 1-2, p. 87-94, 2004.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478 p.

PICOLI, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana: Estudo de caso Usina Catanduva**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.

PICOLI, M.C.A.; RUDORFF, B.F.T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 3, 2009.

PRIMICIERO, J.; GENNARO, S. F. D.; FIORILLO, E.; GENESIO, L.; LUGATO, E.; MATESE, A.; VACCARI, F. P. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. **Precision Agriculture**, n. 13, 2012, p. 517-523.

PINO, F. A. Estimativa subjetiva de safras agrícolas. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 31, n. 6, p. 55-58, 2001.

PIRES, R. C.; SAKAI, E.; ARRUDA, F. B.; FOLEGATTI, M. V. Necessidade hídrica das culturas e manejo de irrigação. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2001. p. 121-194.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: A. Silva Vieira, 2010. 136 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 160 p.

PRINCE, S. D. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1983. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 12, n. 6, p.1301-1311, 1991a.

PRINCE, S. D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 12, n. 6, p. 1312-1330, 1991b.

PRINCE, J. C.; BAUSCH, W. C. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 52, n. 1, p. 55-65, 1995.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p. 438-447, 2009.

RASMUSSEN, M. S. Operational yield forecasting using AVHRR NDVI data: reduction of environmental and inter-annual variability. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 18, n. 5, p.1059-1077, 1997.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: **ERTS-1 SYMPOSIUM**, 3, 1973, Washington, DC. Washington: NASA SP-351, 1973. p. 309-317.

SALASSIER, B. Manejo da Irrigação na Cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 2006, Goiás, GO. **Anais...** Brasília, DF: ABID, 2006.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-7, 1996.

- SENTELHAS, P.C.; ANGELOCCI, L.R. Balanço hídrico: BH climatológico normal, sequencial, de cultura e para o controle de irrigação. ESALQ/USP. 2007. Disponível em: < <http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/aula9.pps> >. Acesso em: 18/05/2016.
- SILVA, M. A.; JERONIMO, E. M.; LÚCIO, A. D. C. Perfilamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 979-986, 2008.
- SILVA NETO, S. P. Expansão da demanda sustenta produção. In: **AGRIANUAL**: Anuário da agricultura brasileira. São Paulo: FNP Consultoria & Agroinformativos, 2004. 794 p.
- SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. **Field Crops Research**, v.78, p.151-164, 2002.
- SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO: sugarcane plant module: scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling: **South African Sugarcane Research Institute**, 2008. 34p.
- SMITH, G. M.; FULLER, R. M. Na integrated approach to land cover classification: na example in the Island of Jersey. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 22, p.3123-3142, 2001.
- 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.
- STONE, T. A.; SCHLESINGER, P.; HOUGHTON, R. A.; WOODWELL, G. M. A map of the vegetation of South America based on satellite imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 60, n. 5, p. 541-551, 1994.
- STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; CANTO, M. W.; HECKTHEUER, L. H. H. As clorofilas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 748-755, 2005.
- SUGAWARA, L.M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, C.C.; PICOLI, M.C.A.; ADAMI, M. Estimativa de produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) por meio de técnica de análise de regressão linear múltipla. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis, 2007, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p.435-442.
- SUGUITANI, C.; MATSUOKA, S. Efeitos do fósforo nas características industriais e na produtividade agrícola em cana-de-açúcar (cana-planta) cultivada em duas regiões do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28, 2001, Londrina. Ciência do solo:fator de produtividade competitiva com sustentabilidade: resumos. Londrina: **SBCS**, 2001. p. 119.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana-de-açúcar**: avaliação do modelo Mosaic. 2006. 60 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

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

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

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

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.104 p.

TUBIELLO, F. N.; FISCHER, G. Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000-2080. **Technological Forecasting e Social Change**, v. 74, n. 7, p. 1030-1056, 2007.

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

VICENTE, L. E.; GOMES, D.; VIC TORIA, D. C.; GARÇOM, E. A. M.; BOLFE, E. L.; ANDRADE, R. G.; SILVA, G. B. S. Séries temporais de NDVI do sensor SPOT Vegetation e algoritmo SAM aplicados ao mapeamento de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1337-1345, 2012.

ZARCO-TEJADA, P. J.; BERNI, J. A. J.; SUARÉZ, L.; FERERES, E. A new era in remote sensing of crops with unmanned robots. **SPIE**, 2008, 3 p.

ZHANG, MINGHUA, QIN, Z., LIU, X., USTIN, S.L. 2003. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing. **International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation**, v. 4, p. 295–310.

WACLAWOSKY A. J.; SATO, P. M.; LEMBKE, C. G., MOORE, P. H.; SOUZA, G. M. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology**, Hoboken, v. 8, n. 3, p. 263-276, 2010.

WATT, D. A.; MCCORMICK, A. J.; CRAMER, M. D. Source and sink physiology. In: MOORE P. H.; BOTHA, F. C. (Ed.), **Sugarcane**: physiology, biochemistry and functional biology. Oxford: Willey Blackwell, 2014. p. 483-520.

WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J. Spectral components analysis rationale and results for three crops. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 8, n. 7, p. 1001-1032, 1987.

WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: I. Rationale. **American Society of Agronomy**, Madison, v. 82, n. 3, p. 623-629, 1990.

XIANG, H. TIAN, L. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). **Elsevier Biosystems Engineering**, n. 108, 2011, p. 174-190.

3 CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA NAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO CERRADO GOIANO

RESUMO

As áreas cultivadas com cana-de-açúcar vêm se expandindo no estado de Goiás, tanto para a produção de açúcar quanto de álcool. Este estudo teve como objetivo avaliar as respostas da cana-de-açúcar às variáveis agrometeorológicas no Centro-Oeste. O experimento foi conduzido no município de Santo Antônio de Goiás, cuja área produtiva pertence à usina CentroÁlcool S.A. Utilizou-se a variedade de cana-de-açúcar CTC-04 em área produtiva de 193 ha, com cultivo em condições de sequeiro. As avaliações foram realizadas em ciclo de cana-planta e cana-soca (1ª e 2ª soca), referente às safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016. Sendo as variáveis biométricas: altura, diâmetro, número de folhas verdes e índice de área foliar em relação ao tempo e as variáveis climáticas de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento. Os dados meteorológicos diários foram coletados da estação pluviométrica automática da EMBRAPA Arroz e Feijão – localizada no município de Santo Antônio de Goiás. A evapotranspiração foi obtida pelo método de Penman-Monteith padrão FAO, o balanço hídrico climatológico diário foi calculado pela metodologia proposta por Thornthwaite e Mather. Produtividade foi obtida por dados observados no campo. O volume de precipitação nos anos de 2014, 2015 e 2016 nos períodos seco e chuvoso registrou volume inferior ao previsto na normal climatológica. A temperatura média do ar se manteve dentro do previsto para região. O balanço hídrico da cultura registrou nas safras 13/14, 14/15 e 15/16 um déficit hídrico acumulado de 857,91 mm, 772,38 mm, 599,81 mm respectivamente. O comportamento biométrico da cana-de-açúcar cultivada em Santo Antônio de Goiás apresentou uma taxa média de crescimento da altura dos colmos e diâmetro nas safras de 13/14, 14/15 e 15/16 de 0,49 cm dia⁻¹, 0,022 mm, 1,14 cm dia⁻¹ 0,04 mm e 0,75 cm dia, 0,04 mm respectivamente. O número médio de folhas verdes foi de 7 folhas para safras 13/14 e 14/15 e 8 na safra 15/16. A variedade CTC-04 apresentou melhor índice de produtividade em cultivo de sequeiro em ciclo de cana-planta.

Palavras-chave: Saccharum spp., disponibilidade hídrica, produtividade

3 SUGAR CANE CULTIVATED IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE BRAZILIAN SAVANNA

ABSTRACT

The areas cultivated with sugarcane have been expanding in the state of Goiás, both for the production of sugar and alcohol. The objective of this study was to evaluate sugarcane responses to agrometeorological variables in the Midwest. The experiment was carried out in the municipality of Santo Antônio de Goiás, whose productive area belongs to the CentroÁlcool S.A. plant. The sugarcane variety CTC-04 was used in a productive area of 193 ha, with cultivation under dry conditions. The evaluations were carried out in the cane

plant and cana soca cycle (1st and 2nd soca), referring to the harvests of 2013/2014, 2014/2015 and 2015/2016. The biometric variables were: height, diameter, number of green leaves and index of leaf area in relation to time and climatic variables of precipitation, air temperature, relative humidity, wind speed. The daily meteorological data were collected from the automatic rainfall station of EMBRAPA Arroz e Feijão - located in the municipality of Santo Antonio de Goiás. Evapotranspiration was obtained by the FAO standard Penman-Monteith method, the daily climatological water balance was calculated by the methodology proposed by Thornthwaite and Mather. Productivity was obtained by data observed in the field. The precipitation volume in the years of 2014, 2015 and 2016 in the dry and rainy periods registered a volume lower than predicted in the climatological normal. The average air temperature remained within the expected range. The water balance of the crop recorded in crop seasons 13/14, 14/15 and 15/16 an accumulated water deficit of 857.91 mm, 772.38 mm, 599.81 mm respectively. The biometric behavior of sugarcane grown in Santo Antônio de Goiás presented a mean growth rate of stem height and diameter in the 13/14, 14/15 and 15/16 yields of day⁻¹, 0.022 mm, 1.14 cm dia⁻¹ 0.04 mm and 0.75 cm dia, 0.04 mm respectively. The average number of green leaves was 7 leaves for crops 13/14 and 14/15 and 8 in the 15/16 crop. The CTC-04 variety showed a better productivity index in rainfed cultivation in the cane-plant cycle.

Key words: Saccharum spp., water availability, productivity.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a cana-de-açúcar vem apresentando significativo crescimento tanto em área plantada quanto em produtividade. Na safra 2016/2017, ocupou uma área de plantio de 1.020,8 milhões de hectares, com produtividade média estimada de 72,02 toneladas por hectare (CONAB, 2017). Vale ressaltar que a produtividade brasileira corresponde a mais de um terço da produção mundial (FAO, 2015). O estado de Goiás destaca-se como o segundo maior produtor da cultura, com área plantada de 962,6 mil hectares com produtividade de 70.253 kg ha⁻¹, sendo superado apenas pelo estado de São Paulo, com área igual a 4.773,2 mil hectares com produtividade 77.501 kg ha⁻¹.

O crescimento e o desenvolvimento vegetal são processos relacionados e que podem ocorrer simultaneamente ou não. O crescimento vegetal é o aumento irreversível em alguma dimensão física da planta ou de um de seus órgãos com o tempo, como é o caso do aumento em massa seca e em altura. O desenvolvimento é o processo no qual células e órgãos passam por vários estádios identificáveis durante o seu ciclo de vida (Wilhelm & McMaster, 1995).

A cana-de-açúcar é uma gramínea da família *Poaceae*, e como pode ter vários ciclos de desenvolvimento, é caracterizada como uma cultura semiperene, permitindo uma média de cinco cortes para, posteriormente, ser feita a reforma do canavial. Possui um rápido

crescimento em que 80% de toda matéria seca é acumulada, reprodução abundante e aproveitamento econômico de grande parte da planta. O ciclo fenológico da cana-de-açúcar é composto pelas fases de brotação, perfilhamento, crescimento e maturação (Scarpari & Beauclair, 2010).

Os componentes estruturais da cana-de-açúcar (biomassa dos colmos e sacarose) condicionam a produção de açúcar ou de álcool, sendo que o incremento de um deles pode aumentar o rendimento final da cultura (Inman-Bamber et al., 2002; Singels et al., 2005). A análise do crescimento em cana-de-açúcar, em termos de produção e partição de biomassa possui relevância para o entendimento dos mecanismos que proporcionam aumento na eficiência produtiva da cultura em resposta às condições ambientais (Marafon, 2012). O sistema de produção da cana-de-açúcar, semelhante a outras culturas agrícolas, pode ser afetado por fatores relacionados à planta (cultivares e ciclo), ao solo (textura e fertilidade), às práticas culturais (época de plantio, densidade de plantio, rotação de cultura) e, especialmente, às condições climáticas (temperatura, umidade relativa, vento radiação e precipitação) (Bell & Garside, 2005; Bonnet et al., 2006; Gilbert et al., 2006; Park et al., 2005).

A análise de crescimento da cana-de-açúcar tem permitido identificar as fases de desenvolvimento da cultura nos diferentes ambientes de cultivo, proporcionando sua condução, de forma que o máximo desenvolvimento coincida com os períodos de maior disponibilidade hídrica e radiação solar, o que leva a cultura a expressar todo o seu potencial genético, além de permitir manejar diferentes formas de adubação e tratos culturais (Keating, et al., 1999; Stone et al., 1999). O crescimento da parte aérea da cana-de-açúcar pode ser dividido em três etapas: fase inicial, em que o crescimento é lento; fase de crescimento rápido, com surgimento e alongamento de entrenós, em que se acumulam cerca de 75% da matéria seca total, e fase final, em que novamente há crescimento lento (Robertson et al., 1996; Inman-Bamber et al., 2002; Oliveira et al., 2007).

São escassas as informações que caracterizam o crescimento, desenvolvimento e a produtividade de cultivares de cana-de-açúcar sob as condições climáticas do Cerrado goiano. O clima predominante no domínio do Cerrado é tropical, de inverno seco. A temperatura média anual fica em torno de 22 – 23 °C, as temperaturas máximas não variam muito ao longo dos meses do ano, podendo chegar a mais de 40 °C, já as mínimas mensais variam bastante, atingindo valores próximos ou até abaixo de zero, nos meses de maio, junho e julho. A precipitação média anual entre 1200 e 1800 mm, apresenta estacionalidade

concentrando-se nos meses de primavera e verão (outubro a março), curtos períodos de seca, chamados de veranicos, podem ocorrer em meio à estação, criando sérios problemas para a agricultura (Coutinho, 2002).

Assim, este estudo teve por objetivo avaliar as respostas da cana-de-açúcar às variáveis agrometeorológicas atuantes do Centro-Oeste.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na Fazenda Louzandira, no município de Santo Antônio de Goiás – GO ($16^{\circ} 29' 21,93''$ S; $49^{\circ} 18' 46,60''$ O; 769 m) (Figura 3.1), área arrendada pela destilaria CentroÁlcool. Segundo a classificação climática proposta por Köppen, o município de Santo Antônio de Goiás – GO apresenta clima Aw, tropical de savana, megatérmico. O regime pluvial é bem definido, contendo uma estação chuvosa (outubro-abril) e uma seca (maio-setembro), sendo a média anual igual a 1.531 mm (Silva et al., 2014).

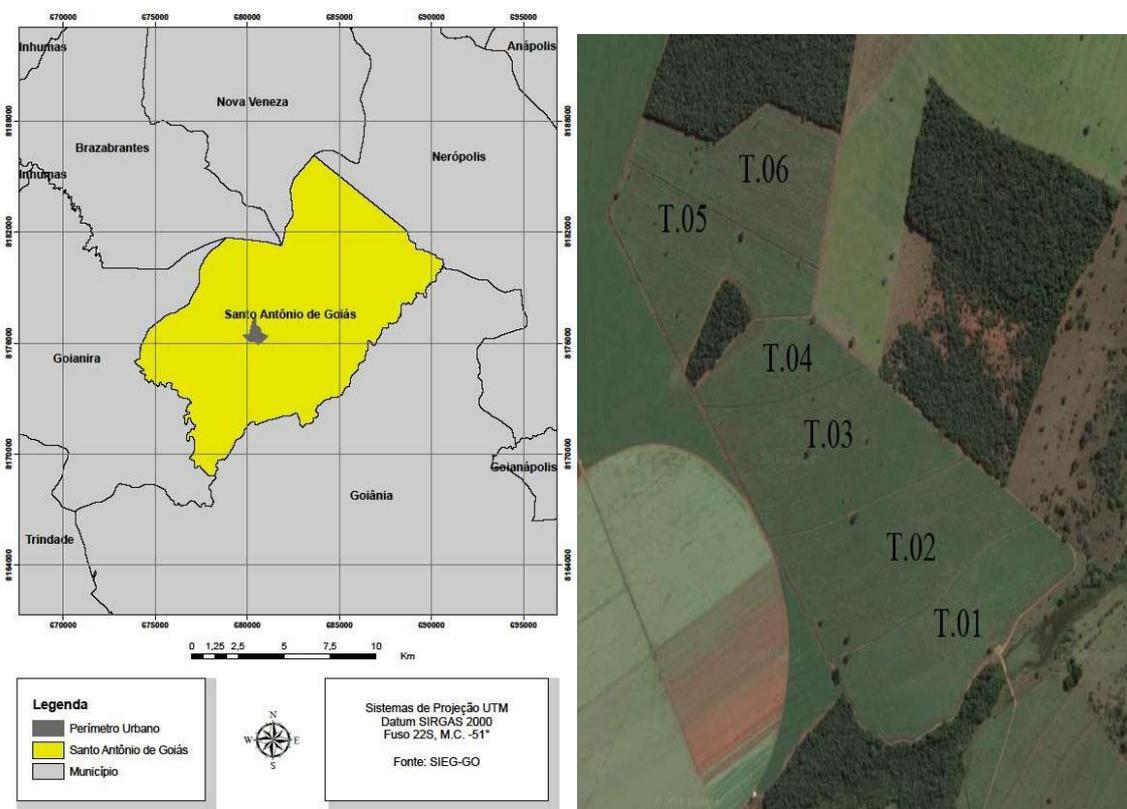


Figura 3.1 Área de estudo de cultivo de cana-de-açúcar em Santo Antônio de Goiás, 10 km de Goiânia e 180 km de Brasília-DF.

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado em abril de 2013, adotando-se o sistema de plantio semi-mecanizado, com mudas pré-brotadas, em espaçamento de 1,50 m, utilizando a variedade CTC-4, classificada como ciclo médio-tardio. O estudo foi realizado em ciclo de cana-planta e cana-soca (1° e 2° soca), referente às safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016, em área produtiva de 193 ha, o cultivo foi realizado em condições de sequeiro.



Figura 3.2 Área do experimento de cana-de-açúcar variedade CTC-4 em Santo Antônio de Goiás-GO com 30 dias após o plantio. Fonte: O autor.

O solo da área estudada foi classificado como um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura média: 27% de argila, 13% de silte e 60% de areia (Araujo et al., 2016).

Tabela 3.1 Análise química do solo Latossolo vermelho-amarelo distrófico em Santo Antônio de Goiás-GO.

Talhão	Data	PH Ca Cl ₂	g/dm ³	Mg/dm ³	mmol C/dm ³			%			
			M.O.	P Resina	K	H+Al	Ca	Mg	CTC	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	26	3	0,3	30	13	9	52,3	22,3	43
5	18/06/2012	5	27	4	0,3	32	14	10	56,3	24,3	43
6	18/06/2012	5	27	4	0,3	32	14	10	56,3	24,3	43

A partir da análise química do solo (Tabela 3.1), procedeu-se preparo do solo antes do plantio a correção com a aplicação de calcário (4,0 t ha⁻¹) e gesso (2,0 t ha⁻¹). A

adubação foi feita pela aplicação de 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.

Os dados meteorológicos diários foram coletados da estação pluviométrica automática da EMBRAPA – Arroz e Feijão, localizada no município de Santo Antônio de Goiás. A distância entre o posto meteorológico em questão e a área experimental 7,0 km da área de estudo. A distância da estação meteorológica está em conformidade com os padrões do guia de instrumentos meteorológicos e métodos de observação da Organização de Meteorologia Mundial (OMM), onde instrui que a estação meteorológica possui uma representatividade de um raio de 100 km em torno da estação, mas para aplicações em pequena escala ou locais, a área considerada pode ter dimensões de 10 km ou menos (WMO-Nº8, 2008). Os dados coletados em escala diária ao longo do experimento foram temperaturas máximas e mínimas (°C), precipitação (mm), umidade relativa do ar (%), velocidade média do vento a 2 m de altura (m s⁻¹), radiação solar global e saldo de radiação (MJ m⁻²d⁻¹).

As avaliações de biometria foram realizadas em cinco plantas marcadas em cinco pontos da área (Figura 3.1), na safra 2013/2014 em ciclo de cana-planta os dados foram coletados a partir de janeiro de 2014 (298 DAP), período em que foi aprovado pela destilaria a implantação do experimento, com análises realizadas mensalmente. Nas safras de 2014/2015 e 2015/2016 as avaliações iniciaram 30 dias após o corte, repetindo-se a cada 15 dias até o final do ciclo.

Para avaliar o crescimento, desenvolvimento e a produtividade foram adotados as seguintes metodologias:

- i) Fitomassa seca da parte aérea (FSPA) - foram coletadas amostras de colmos e folhas de 10 colmos, procedendo à secagem em estufa de ventilação forçada a 65 °C, durante um período de 10 dias (massa constante), sendo posteriormente pesadas em balança digital e os resultados expressos em g planta⁻¹;
- ii) Altura de colmos: foram medidas em cinco perfilhos ou colmos, com auxílio de uma fita métrica, medindo a distância do solo até a inserção da folha +1, sendo utilizada como padrão de altura de plantas (Silva et al., 2012);

iii) Número de perfilhos - foram contabilizados o número de perfilhos por metro linear, amostrando-se um comprimento de 5 m lineares, procedendo-se posteriormente o cálculo do número médio de perfilhos por m².

iv) Diâmetro de colmo - mensurado com o auxílio de um paquímetro, realizada na base dos colmos, próximo a superfície do solo.

v) Área foliar (AF, cm²) - mediu-se o comprimento (C, cm) e a largura máxima da folha +3 (L, cm) e contabilizou-se o número de folhas verdes ($\geq 20\%$ de área verde), conforme metodologia descrita por Hermann & Câmara (1999) na Equação 1:

$$AF = (C \cdot L \cdot 0,75) \cdot (N + 2) \quad [1]$$

sendo 0,75 o fator de correção para área foliar da cultura.

vi) Índice de área foliar (IAF, m² m⁻²) obtido a partir da razão entre a AF por perfilho, do número de perfilhos por metro linear (NP, m⁻²), e a superfície do solo (S, m²) (Watson, 1947) conforme a Equação 2:

$$IAF = \frac{AF \cdot NP}{S} \quad [2]$$

vii) Taxa de crescimento da cultura (TCC, g dia⁻¹) - contabilizada pela variação da fitomassa seca acumulada pela planta em um intervalo de tempo (tf - ti) (Reis & Muller, 1979; Benicasa, 1988):

$$TCC = \frac{(FS_f - FS_i)}{(t_f - t_i)} \quad [3]$$

em que FS_i é a fitomassa seca inicial e FS_f a fitomassa seca final, obtida após um intervalo de tempo, t_i é a quantidade de dias transcorridos desde o plantio ou corte até a o dia da amostragem, e t_f o tempo da última amostragem do intervalo.

viii) Fitomassa de colmo (FMC) – contabilizada a partir da média da pesagem de 10 colmos por parcela (kg).

ix) Número de colmos por metro (NC) – contabilização do número de colmos das duas linhas centrais de cada parcela, dividindo-se pelo número de metros lineares.

x) Tonelada de colmo por hectare (TCH) - estimado em função da massa média dos colmos da parcela e do número total de colmos presentes nas respectivas parcelas e um fator que é em função do espaçamento de plantio, conforme evidencia a seguinte equação: $TCH = M1C \cdot NCM \cdot (100/1,5) \cdot (100/1000)$. Sendo que 1,5 referem-se ao espaçamento entre linhas, 100 referem-se aos metros lineares de um hectare, e 1000 é a correção de quilos para toneladas.

A Evapotranspiração potencial ou de referência (ET_o, mm dia⁻¹) foi estimada pelo método de Penman-Monteith, padrão - FAO 56 (Allen et al., 2006):

$$ET_0 = \frac{0,408 s (Rn - G) + \frac{900U_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + (1 + 0,34U_2)} \quad [4]$$

sendo: s a declividade da curva de pressão parcial de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), estimada a partir de $(4098e_s)/(237,3 + T)^2$, Rn o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), G o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), γ a constante psicrométrica ($0,063 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), T a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), U_2 a velocidade do vento a 2,0 m de altura (m s^{-1}), e_s e e_a são, respectivamente, a pressão de vapor de água na saturação e atual (kPa), estimadas a partir do seguinte conjunto de equações:

$$e_s = (e_{sT_{\max}} + e_{sT_{\min}}) / 2 \quad [5]$$

$$e_{sT} = 0,611 * 10^{[(7,5 * T)/(237,3 + T)]} \quad [6]$$

$$e_a = (UR_{\text{med}} * e_s) / 100 \quad [7]$$

$$UR_{\text{med}} = (UR_{\text{max}} + UR_{\text{min}}) / 2 \quad [8]$$

$$T = (T_{\text{max}} + T_{\text{min}}) / 2 \quad [9]$$

onde T_{max} é a temperatura máxima do ar ($^\circ\text{C}$), T_{min} é a temperatura mínima do ar ($^\circ\text{C}$), UR_{max} a umidade máxima do ar (%) e UR_{min} a umidade mínima do ar (%).

O fluxo de calor no solo (G) foi calculado a partir da diferença entre a temperatura média diária (T_{md}) e a temperatura média dos três dias anteriores ($T_{3\text{md}}$), pela Equação 10, descrita por Silva et al. (2011):

$$G = 0,38 \cdot (T_{\text{md}} - T_{3\text{md}}) \quad [10]$$

O coeficiente de cultura (Kc) adotado para o cálculo do balanço hídrico da cultura, para cada estágio do desenvolvimento, encontra-se na Tabela 3.2. Para a safra de cana planta em 2013/2014 e cana soca em 2014/2015 e 2015/2016.

Tabela 3.2 Coeficiente de cultura (kc) para cana planta e cana soca em diferentes períodos de desenvolvimento.

Cana planta		Cana soca	
Dias	Kc	Dias	kc
1-61	0,40	1-61	0,40
62-153	0,75	62-153	0,75
154-244	1,10	154-244	1,10
245-334	1,25	245-334	1,25
335-485	0,70	335-365	0,70

Fonte: Doorenbos & Kassam (1994)

O balanço hídrico da cultura, foi calculado diariamente, desenvolvido em ambiente EXCELTM pelo método proposto por Thornthwaite & Mather (1955), calculado em planilha eletrônica. Para isto, foi determinada a capacidade de água disponível (CAD, mm) pela seguinte Equação (11):

$$CAD = \left(\frac{CC-PMP}{100}\right) \cdot Z_e \quad [11]$$

em que CC e PMP são as respectivas unidades do solo correspondentes a Capacidade de Campo (0,39) e o Ponto de Murcha Permanente, PMP (0,24). Para a profundidade efetiva do sistema radicular Z_e , dada pela média de exploração de 80% das raízes de cana-de-açúcar em 600 mm de profundidade encontrada em cultivo de condições de sequeiro (Farias et al., 2008).

A lâmina de água da CC foi obtida pelo cálculo $L_{am}CC = CC \cdot Z_e$, a lâmina de água do PMP $L_{am}PMP = PMP \cdot Z_e$, $\theta_{crit} = \theta_{cc} - \frac{(\Delta D)}{Z}$, a lâmina do θ_{crit} $L_{am} \theta_{crit} = \theta_{crit} \cdot Z_e$ e a lâmina real $L_{am}real = L_{am}CC + L_{am}PMP$.

Ao longo do ciclo a cultura de cana-de-açúcar foi correlacionada com a amplitude térmica e graus-dia, calculados pelas seguintes equações 12, 13 e 14:

$$Amp = T_{max} - T_{min} \quad [12]$$

Para $TM > Tb > Tm$, tem-se:

$$Gd = \frac{(TM - Tm)^2 + (TM - 25)^2}{2 \cdot (TM - Tm)} \cdot f \cdot NDM \quad [13]$$

E para $Tb < Tm$:

$$Gd = Tm - Tb + \frac{(TM - Tm)}{2} + \frac{(TM - 25)^2}{2 \cdot (TM - Tm)} \cdot f \cdot NDM \quad [14]$$

Onde TM e Tm são as temperaturas máximas e mínimas mensal (°C), respectivamente; Tb a temperatura basal da cana-de-açúcar, $Tb = 20^\circ\text{C}$ (Barbieri et al., 1979).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As relações agrometeorológicas e biométricas serão apresentadas levando em consideração as fases fenológicas da cana-de-açúcar e suas respectivas durações. Os valores médios da precipitação registrada no município de Santo Antônio de Goiás-GO, para o período de janeiro/2013 a dezembro/2016, bem como a normal climatológica de 1986 a 2016 encontram-se na Figura 3.3. A estação chuvosa e seca do ano de 2013 apresentou precipitações maiores que a média histórica (9,06% e 16,76%, respectivamente), sendo a média anual igual a 1.793 mm (Figura 3.3).

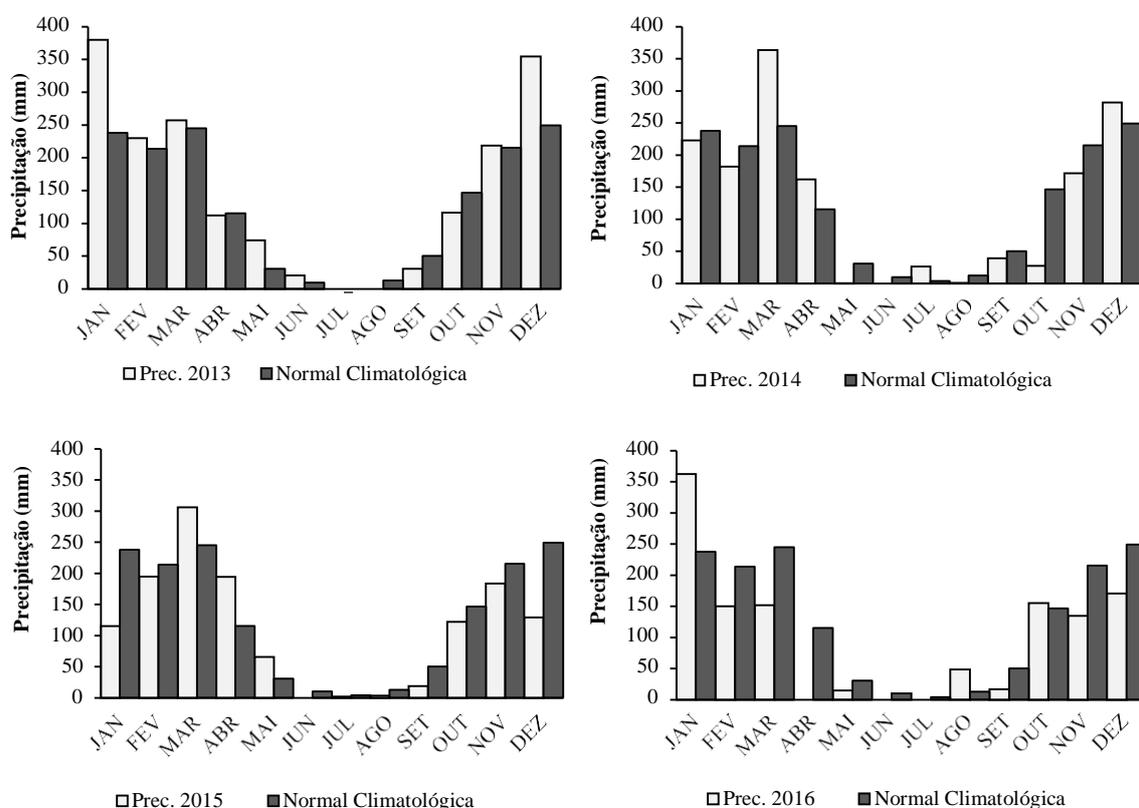


Figura 3.3 Precipitação (Prec.; mm) ocorrida nos anos de 2013 a 2016 com a normal climatológica de precipitação registrada no período de 1986 a 2016 em Santo Antônio de Goiás-GO.

Já nos anos de 2014, 2015 e 2016, o período chuvoso mostrou-se abaixo da média (2,78%, 21,09% e 31,90%, respectivamente), assim como no período seco (37,70%, 16,80% e 25,57%, respectivamente). O total de precipitação ocorrida nos anos de 2014, 2015 e 2016 foram respectivamente de 1.477 mm, 1.333 mm e 1.203 mm (Figura 3.3).

Levando em consideração a demanda hídrica da cana-de-açúcar de 1.500 a 2.500 mm por ciclo (Doorenbos & Kassam, 1979), variando em função dos estádios fenológicos da cultura (Gava et al., 2010), observou-se que as precipitações dos últimos três anos, foram

menores que o valor mínimo exigido pela cultura. Contudo, a região apresentou valores acumulados de precipitação acima da normal climatológica.

Souza et al. (1999), em cultivos de cana-soca com idade de 13 meses e utilizando sistema de irrigação por aspersão tipo canhão, encontraram para as variedades RB 72454, RB 76418 e SP 70-1011, máximas produtividades em colmos da ordem de 155,8, 126,9 e 141,9 t ha⁻¹, com lâminas de água de 1.568, 1.424 e 1.589 mm, respectivamente.

Maule et al. (2001) verificaram que a cultivar SP79-1011 obteve produtividades médias de 149, 154 e 170 t ha⁻¹, com lâminas totais de 1478, 1695 e 1829 mm, para ciclos de 14, 17 e 19 meses, respectivamente. Azevedo (2002) encontrou, para a mesma cultivar, cultivada nos tabuleiros costeiros da Paraíba, produtividades de 52, 79, 93 e 92 t ha⁻¹, para uma precipitação efetiva junto com a irrigação de 609, 761, 905 e 1043 mm, respectivamente, durante 12 meses de cultivo.

A temperatura do ar é outro elemento meteorológico que influencia no crescimento da cana-de-açúcar (Almeida, et al., 2008). Barbieri et al. (1981) determinaram, em condições de campo, que a temperatura basal para a cana-de-açúcar é de aproximadamente 20°C.

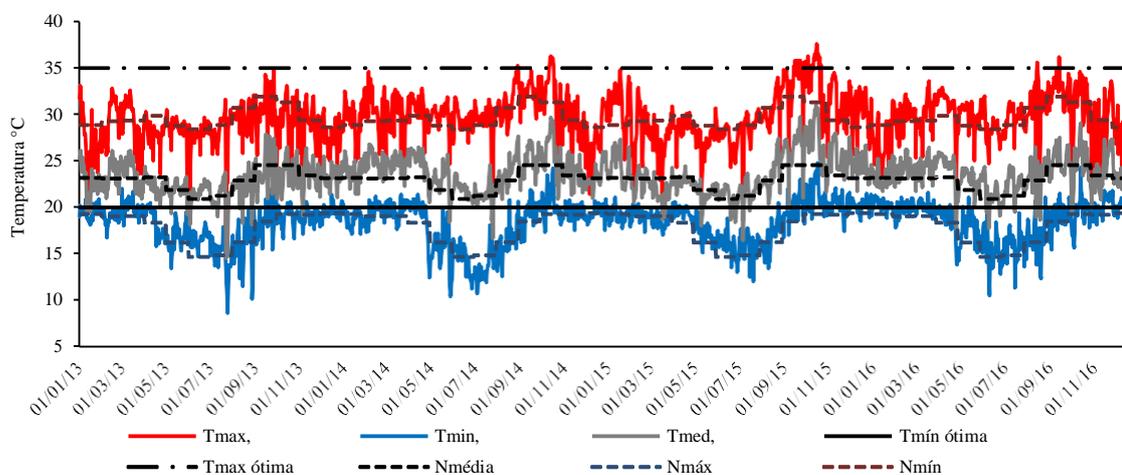


Figura 3.4 Temperatura máxima, mínima e média ocorrida nos anos de 2013 a 2016 com a normal climatológica de temperatura registrada no período de 1986 a 2016 em Santo Antônio de Goiás-GO e a temperatura ótima mínima e máxima para a cultura de cana-de-açúcar.

A temperatura média do ar variou entre 15 °C e 27 °C ao longo da safra de 2013/2014 (Figura 3.4), determinando uma média de 23 °C. A temperatura mínima média foi igual a 17 °C e a temperatura máxima média para o período foi de 29 °C.

Além disso, na safra 2014/2015 a temperatura média do ar variou entre 16 °C e 30 °C. A temperatura máxima variou entre 18 °C e 36 °C, com média 29 °C. A temperatura mínima do ar variou entre 12 °C e 24 °C, com média para o período foi de 18 °C. Durante a safra 2015/2016 a temperatura média do ar variou entre 17 °C a 34 °C com média para o período de 24°C. A temperatura máxima variou de 15 °C a 37 °C, com a média de 29 °C. A temperatura mínima variou de 10 °C a 28 °C, com média de 18 °C.

Os registros de temperatura média do ar máxima e média permaneceram dentro da temperatura basal ($T_b = 20^\circ\text{C}$; Barbieri e Villa Nova 1977) e ($T_b = 35^\circ\text{C}$; Pereira et al., 2015a) para os três ciclos de cultivo (cana-planta, soca 1 e 2). No entanto, a temperatura mínima permaneceu abaixo da temperatura basal, conforme mostra a figura 3.4.

Ferreira Junior (2010), na região de Rio Largo, AL, mediu temperaturas inferiores a 20 °C no decorrer do ciclo de produção da cana-de-açúcar. Mas explica que esses baixos valores de Tar não ocasionaram perdas de eficiência dos processos de crescimento da cultura, tal como fotossíntese, uma vez que foram observados no período noturno, horas do dia em que as plantas praticamente não fazem fotossíntese. Pressupondo-se assim que as baixas temperaturas do ar ocorridas durante a noite ao invés de causar perdas proporcionaram ganhos, visto que temperaturas amenas só diminuem o metabolismo (respiração) das plantas, fazendo com que as mesmas reduzam o consumo de fotoassimilados.

As temperaturas do ar (máxima, mínima e média) ocorridas durante as safras de cultivo da cana-de-açúcar em cana-planta, 1ª soca e 2ª soca ficaram dentro intervalo adequado ao desenvolvimento da cultura. Ocorreram valores de temperatura mínima inferiores a 20 °C, no entanto estas foram registradas no período noturno onde a produção de fotoassimilados é nula.

Graus-dia ou soma térmica é definido como o acúmulo diário de energia que se situa acima da condição mínima e abaixo da máxima exigida pela planta para completar determinada fase fenológica ou mesmo o seu ciclo total de desenvolvimento (Ometto, 1981). Na figura 3.5 apresenta os graus-dia acumulados durante os anos de 2013 a 2016 e o graus-dia obtido com a normal climatológica da região de Santo Antônio de Goiás.

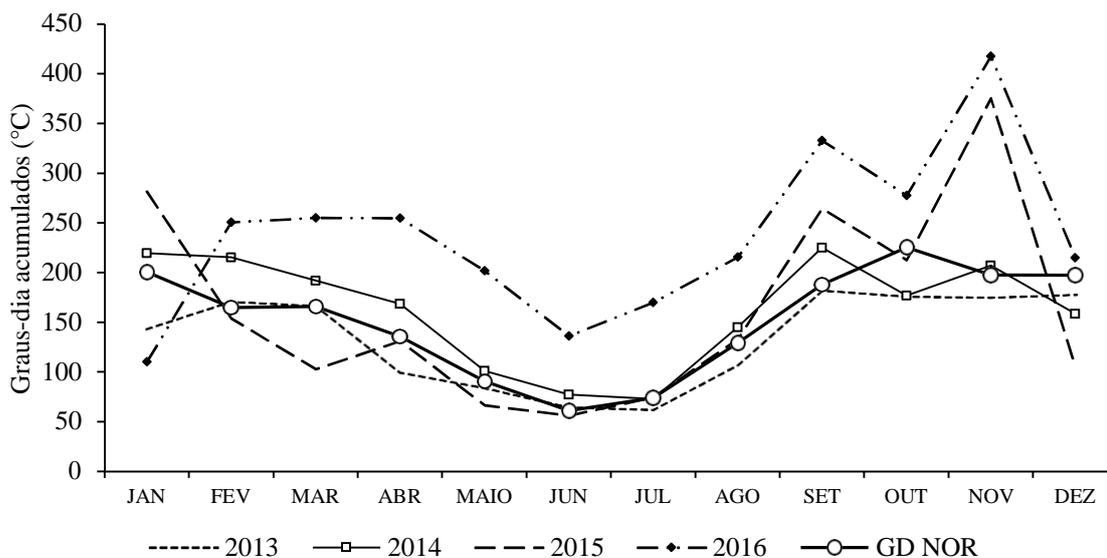


Figura 3.5 Graus-dia acumulados mensalmente registrados durante os anos de 2013 a 2016 e graus-dias acumulados obtido com a normal climatológica da região de Santo Antônio de Goiás.

No ano de 2013 os graus-dias acumulados na região foi de 1.608,46 °C comparando com o registrado pela normal climática da região o ano de 2013 apresentou um acumulado final de 13,84% inferior. Em 2014 o acumulado de graus-dia foi de 1.959,38 °C, sendo 7,01% acima aos graus-dias acumulados esperados para região. Em 2015 os registros de graus-dia acumulados foram de 6,9% acima, com um total de 1.958,64. No ano de 2016 foi registrado um total de graus-dia acumulado final de 2.838,70 °C, sendo 55,03% acima quando se compara com o graus-dia obtido com a normal climatológica da região (Figura 3.5).

Analisando os acumulados de graus-dia por fase, as maiores taxas ocorreram no ciclo de 2ª soca. Na figura 3.6 apresenta o acumulado mensal ocorrido de graus-dia negativo nos anos de 2013 a 2016, com o graus-dia negativo obtido com os dados da normal climatológica da região.

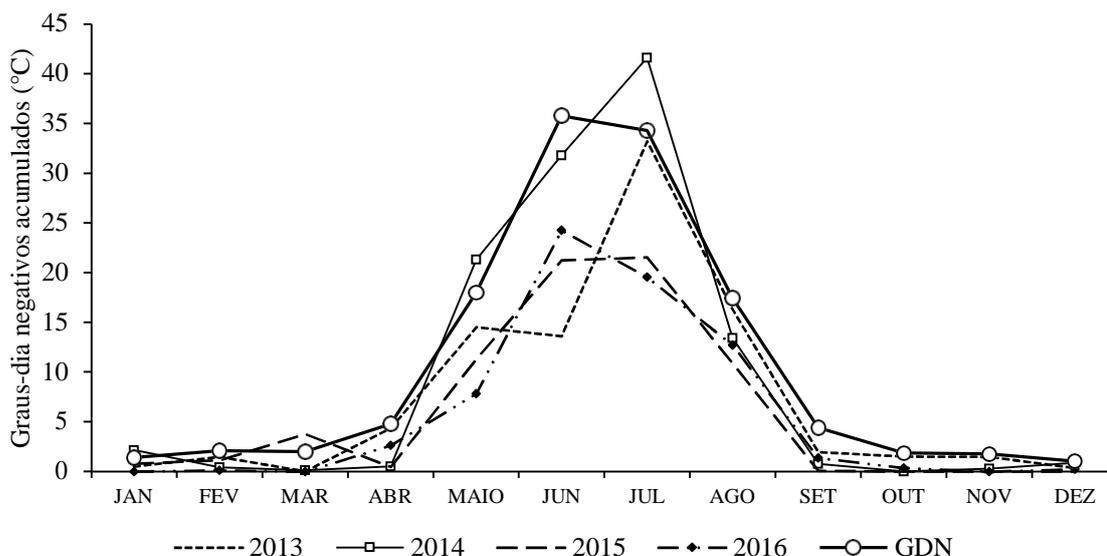


Figura 3.6 Graus-dia negativos acumulados mensalmente registrados durante os anos de 2013 a 2016 e graus-dias acumulados obtidos com a normal climatológica da região de Santo Antônio de Goiás.

O acumulado dos graus-dia negativos registrados no período de 2013 a 2016 foram abaixo dos graus-dia negativos obtidos da normal climatológica (124,75 °C). O acumulado anual foram 89,21 °C, 113,24 °C, 71,29 °C e 69,01 °C referente a 2013 a 2016 respectivamente (Figura 3.6).

As variáveis meteorológicas possibilitam a determinação do balanço hídrico, ferramenta importante para análise climática de uma região. Por meio do balanço hídrico obtido com as informações da normal climatológica mensal do município de Santo Antônio de Goiás – Go, do período de 1983 a 2004, observa-se que há um total anual de evapotranspiração potencial de 1.429 mm. Baseado no balanço hídrico de referência a região apresentou um déficit hídrico de 442 mm e um excedente de 486 mm (Figura 3.7).

A lâmina da capacidade de campo (L_{amCC}) calculada para a região foi de 239 mm, a lâmina do ponto de murcha permanente (L_{amPMP}) foi de 144 mm e a lâmina crítica (L_{amcrit}) foi de 191 mm. A lâmina real de água no solo de referência obtida com a normal climatologia oscilou conforme cada mês do ano e pode ser observada na Figura 3.7. Nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, novembro e dezembro a lâmina real (L_{amreal}) obtida para a região permaneceu acima da L_{amcrit} . Já nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro foi registrado valores abaixo da L_{amcrit} , sendo que os meses de agosto e setembro a L_{amcrit} equiparou a L_{amPMP} (Figura 3.7).

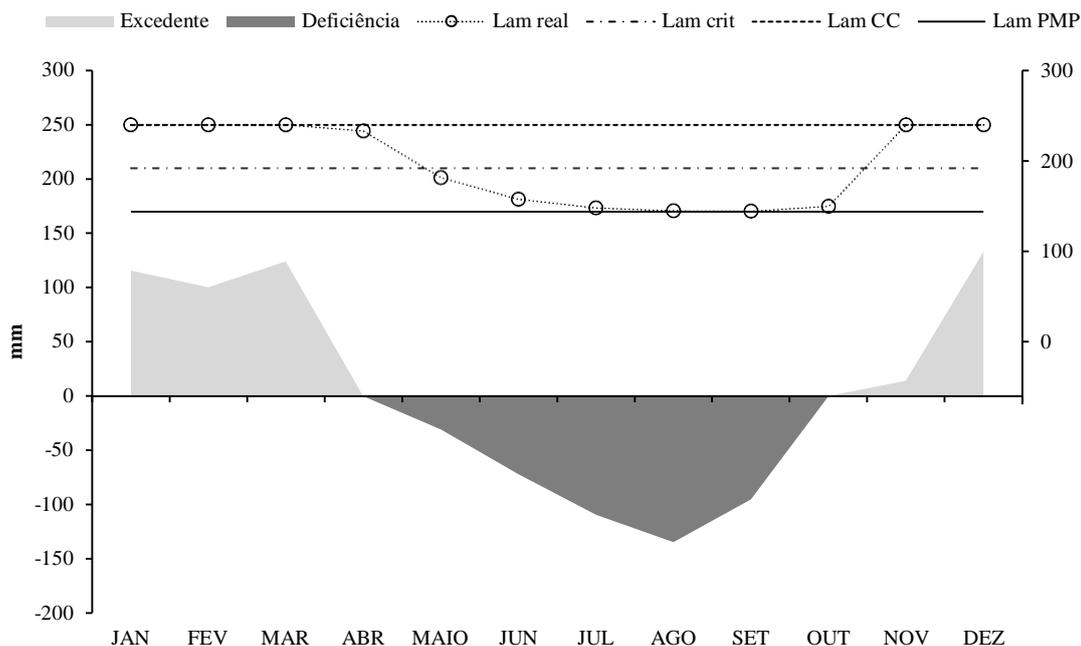


Figura 3.7 Extrato do balanço hídrico mensal obtido com normal climatológica com o excedente hídrico (EXC), deficiência hídrica (DEF), lâmina crítica, lâmina real, lâmina da capacidade de campo e lâmina do ponto de murcha permanente realizado no município de Santo Antônio de Goiás-GO do período de 1983 a 2004.

Por meio do balanço hídrico de cultivo específico de uma cultura, podemos obter o balanço hídrico do solo. Com o balanço hídrico da cana-de-açúcar é possível identificar os períodos de déficit e superavit hídrico, calculados dentro dos ciclos e da fase fenológica da cultura. O balanço hídrico para a cultura de cana-de-açúcar, na safra 2013/2014, em cultivo de cana-planta do período de 01/04/2013 à 30/09/2014, determinou um déficit hídrico acumulado (DEF_{acum}) total de 857,91 mm, a maior lâmina de DEF_{acum} em um mês (105,97 mm) foi registrada em outubro de 2013. A evapotranspiração real total foi 1.078,09, com mínima $0,05 \text{ mm dia}^{-1}$ em 03/09/2014 (521 DAP), máxima de $8,02 \text{ mm dia}^{-1}$ registrada em (312 DAP) e a média para a safra foi de $1,97 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 3.8).

No estágio de brotação (50 DAP) da cana-planta ocorreu um DEF_{acum} de 20,73 mm e no perfilhamento (120 DAP) 153,21 mm. No balanço hídrico normal o registro para este estágio foi de 31,15 mm e 316,35 respectivamente. A evapotranspiração real da cultura acumulada (ETR_{acum}) na brotação foi de 69,27 mm e durante o perfilhamento foi de 71,22 mm, comparando com a evapotranspiração da cultura acumulada (ETC_{acum}) durante o estágio de brotação e perfilhamento foi registrado uma redução de 23,02% e 68,72% respectivamente.

A lâmina real de água no solo para o estágio de brotação e perfilhamento foi de 212,19 mm e 172,92 mm. Na brotação a $L_{m_{real}}$ esteve acima da $L_{m_{crit}}$ estipulada para a região, trazendo condições adequadas para uma plena brotação. Já no perfilhamento a $L_{m_{real}}$ esteve abaixo da $L_{m_{crit}}$ em 19 mm, circunstancia que pode ter causado uma redução no perfilhamento (Figura 3.8).

Durante o estágio de crescimento (340 DAP) na safra de 2013/2014 o DEF_{acum} foi de 334,75 mm, considerado alto (71%) quando comparado ao déficit ocorrido no balanço hídrico normal. A ETR_{acum} no crescimento foi de 773,75 mm, registro inferior em 30,39% comparado com a ETC_{acum} . Este estágio fenológico iniciou em setembro, período de estiagem da região de cultivo de cana-de-açúcar, a lâmina de água real neste período oscilou de 235 à 151 mm (Figura 3.8), permanecendo abaixo da lâmina crítica durante os meses de setembro, outubro e novembro.

No estágio de maturação da cana-planta (480 DAP) foi registrado o DEF_{acum} de 349,21 mm, valor inferior em 21% ao registrado no balanço hídrico normal. A ETR_{acum} na maturação foi de 159,36 mm confrontando com a ETC_{acum} este registro foi 92,36% inferior. Neste período a lâmina real média de água no solo foi de 180 mm, oscilando entre 233 mm à 148 mm, com máxima em abril de 233 mm e mínima de 148 mm registrada no mês de agosto (Figura 3.8), quando comparada com a média da lâmina real normal registrada neste período, notou-se que a mesma foi superior em 6%.

O balanço hídrico para a cultura de cana-de-açúcar, na safra 2014/2015, em cultivo de cana soca do período de 01/10/2014 à 16/10/2015, determinou um déficit hídrico acumulado (DEF_{acum}) total de 772,38 mm, a maior lâmina de DEF_{acum} em um mês (192,84 mm) foi registrada em julho de 2015. A evapotranspiração real total foi 536,10 mm, com mínima 0,01 mm dia⁻¹ em 12/08/2015 (316 DAC), máxima de 5,85 mm dia⁻¹ registrada em 09/09/2015 (344 DAC) e a média para a safra foi de 1,48 mm dia⁻¹ (Figura 3.8).

No segundo ciclo de cultivo da cana-de-açúcar (1ª soca) no estágio de brotação (30 DAC) foi registrado um DEF_{acum} de 57,11 mm, já no balanço hídrico normal não houve registro de deficiência hídrica neste período. A ETR_{acum} foi de 11,07 mm, comparando com a ETC_{acum} foi registado uma redução de 83,77%.

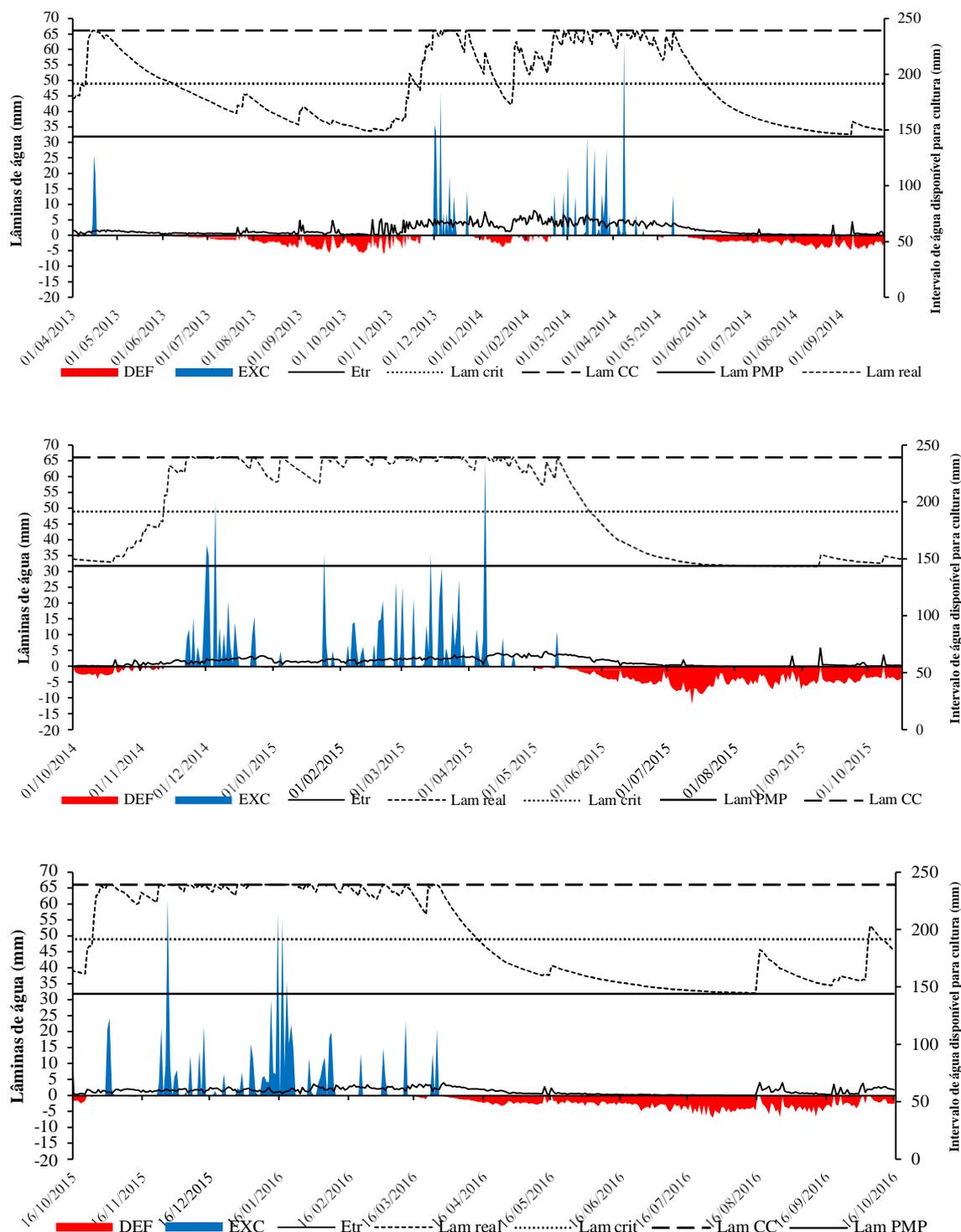


Figura 3.8 Extrato do balanço hídrico diário com o excedente hídrico (EXC), deficiência hídrica (DEF), evapotranspiração da cultura (ETc), lâmina crítica, lâmina real, lâmina da capacidade de campo e lâmina do ponto de murchar permanente realizado no município de Santo Antônio de Goiás-GO das safras 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.

A lâmina de água real média no solo de 152,10 mm ao se comparar com a lâmina real normal foi possível observar que na brotação da segunda safra de cana-de-açúcar, ocorreu lâmina real de água no solo superior da normal em 1%. No estágio de perfilhamento (80 DAC) o DEF_{acum} foi de 19,66 mm, sendo o DEF_{acum} de referência de 0,25 mm. A ETR_{acum} foi de 346,97 mm e a ETC_{acum} 5,35% inferior em relação a ETR_{acum} . A lâmina média de água disponível no solo foi de 230,30 mm, confrontando com a lâmina média de referência o registro neste estágio foi inferior em 3,26% (Figura 3.8).

Ao longo do estágio de crescimento da cultura (260 DAC) foi registrado um DEF_{acum} de 410,18 mm, 15% acima do balanço hídrico de referência. A ETR_{acum} foi de 178,92 mm, confrontando com o registro de ETC_{acum} 69,63% inferior. Este período com maior déficit hídrico iniciou-se a partir do dia 13/05/2015 conforme mostra a Figura 3.8, onde é possível observar o declive na lâmina real de água disponível no solo chegando a 144,55 mm, próxima da lâmina do ponto de murcha permanente de 144 mm. Neste estágio com a redução das chuvas o armazenamento de água no solo foi insuficiente para o desenvolvimento ótimo da cultura, não suprimindo o consumo de água reduzindo os valores de ETR. Na maturação (320 DAC) o DEF_{acum} foi de 229,71 mm, medida acumulada superior quando comparada ao DEF_{acum} obtido no balanço hídrico de referência que registrou neste estágio 95,45 mm. A ETR_{acum} foi de 19,01 mm, comparando com a ETC_{acum} o registro foi inferior em 92,36%. A lâmina de água disponível chegou ao seu menor índice de 144,16 mm no início de setembro, com média para todo o período de 146,80 mm.

Silva et al. (2012b) determinaram o requerimento hídrico da cana-soca irrigada, variedade RB 92579, cultivada na região semiárida do Submédio do Vale do São Francisco (Juazeiro, BA). Os autores observaram que na fase de brotação e estabelecimento da cultura, a ETc oscilou em torno de $3,0 \text{ mm d}^{-1}$, no entanto, na fase de estabelecimento e perfilhamento o valor médio da ETc aumentou para $3,8 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto na fase vegetativa máxima os valores da evapotranspiração da cultura atingiram, em média, $5,1 \text{ mm d}^{-1}$, destacando-se como o mais elevado do ciclo produtivo da cana-de-açúcar.

O balanço hídrico para a cultura de cana-de-açúcar, na safra 2015/2016, em cultivo de 2ª cana soca do período de 16/10/2015 à 16/10/2016, determinou um déficit hídrico acumulado (DEF_{acum}) total de 599,81 mm, a maior lâmina de DEF_{acum} em um mês (130,47 mm) foi registrada em julho de 2016. A evapotranspiração real total foi 519 mm, com mínima $0,03 \text{ mm dia}^{-1}$ em 14/08/2015 (305 DAC), máxima de $4,03 \text{ mm dia}^{-1}$ registrada em 29/03/2016 (168 DAC) e a média para a safra foi de $1,41 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 3.8).

No terceiro ciclo da cana-de-açúcar (2ª soca) o estágio de brotação (30 DAC) e perfilhamento (80 DAC) os registros de DEF_{acum} na região foi de 20,29 mm e 38,07 mm respectivamente. Não houve registro de déficit hídrico no balanço hídrico de referência durante a brotação. No perfilhamento o DEF_{acum} de referência foi de 0,25 mm. A ETR_{acum} para os estádios de brotação e perfilhamento foram de 39,56 mm e 342,93 mm, sendo inferior a ETC_{acum} para o período em 29,36% e 11,10% respectivamente. A lâmina de água média no solo durante a brotação foi de 175,70 mm e no perfilhamento de 231,5 mm. Confrontando com o balanço hídrico de referência a lâmina real normal média foi de 149,64 mm e 238 mm (Figura 3.8).

No estágio de crescimento (260 DAC) o DEF_{acum} foi de 355,95 mm, 2,43% acima comparado ao DEF_{acum} de referência. A ETR_{acum} foi de 15,43 mm, relacionado com a ETC_{acum} o valor foi inferior em 87,56%. A lâmina média de água no solo foi de 156,20 mm, comparando com a com a lâmina de referências esperada que foi de 172,87 mm, no estágio de crescimento a cultura não teve o suprimento hídrico adequado. Neste estágio a lâmina real de água no solo começou a reduzir (Figura 3.8) devido a um veranico ocorrido em março de 2016, onde era esperado uma precipitação de 245 mm e ocorreu apenas 151 mm.

No estágio de maturação da cana-de-açúcar (320 DAC) na safra de 2015/2016 foi totalizado um déficit hídrico de 179,57 mm, para este estágio era previsto um DEF_{acum} de 95,45 mm. A ETR_{acum} foi de 56,94 mm, quantidade inferior quando comparado com a ETC_{acum} esperada em 75,88%. A lâmina de água média real no solo foi de 159 mm (Figura 3.8).

As variáveis biométricas foram avaliadas em função do tempo. Almeida et al. (2008), avaliando o crescimento de quatro cultivares de cana-de-açúcar (SP79-1011, RB93509 e RB931530) na região de Tabuleiros Costeiros de Alagoas em dois ciclo de cultivo (cana-planta e cana-soca), separaram em três fases o ciclo de crescimento da cultura, sendo que a determinação das fases de crescimento da cultura foi realizada de acordo com as taxas de crescimento da cultura: fase 1 - estabelecimento (0 - 160 DAP) taxas de crescimento de 0,2 a 0,9 cm dia⁻¹, fase 2 - crescimento linear (160 - 270 DAP) maior que 0,9 cm dia⁻¹ e na 3 fase de maturação (270 - 365 DAP) menor que 0,2 cm dia⁻¹.

As variáveis biométricas da cana-de-açúcar dentro de cada estágio fenológico e ciclo tiveram valores ajustados a modelos matemáticos sigmoide, gaussiano, exponencial ou log-normal, conforme apresenta a figura 3.9.

Na safra de cana-planta (2013/2014) as análises começaram a partir da 2 fase (crescimento linear) onde apresentou taxa média de crescimento de $0,93 \text{ cm dia}^{-1}$. Na 3 fase (maturação) a cana-de-açúcar obteve uma taxa média de crescimento de $0,77 \text{ cm dia}^{-1}$, de acordo com a Figura 3.9.

Na safra 2014/2015 em ciclo de 1ª soca observou-se que na fase 1 (estabelecimento da cultura) ocorreu uma taxa de crescimento média da altura de colmo de $1,11 \text{ cm dia}^{-1}$. Na fase 2 (crescimento linear) a taxa de altura média foi de $1,2 \text{ cm dia}^{-1}$ e na fase 3 (maturação) $0,94 \text{ cm dia}^{-1}$ (Figura 3.9).

Na safra de 2015/2016 em 2ª soca, durante a fase 1 (estabelecimento da cultura) a taxa de crescimento médio da altura de colmo foi de $0,87 \text{ cm dia}^{-1}$, na fase 2 (crescimento linear) a taxa foi de $0,72 \text{ cm dia}^{-1}$ e na fase 3 (maturação) $0,60 \text{ cm dia}^{-1}$ (Figura 3.9).

Oliveira et al. (2005), estudando o crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no Paraná observaram, durante o período de grande crescimento da cana-planta, taxas de alongação do colmo de $1,6 \text{ cm dia}^{-1}$ na RB 855113, $1,8 \text{ cm dia}^{-1}$ na RB 855536 e 2 cm dia^{-1} na RB 72454 e atribuíram o efeito na redução da taxa de alongação ao aumento do auto sombreamento durante o período de maturação, o que diminuiria a taxa fotossintética média de toda a área foliar.

O diâmetro da cana-de-açúcar na safra de 2013/2014 na fase 2 apresentou taxa de crescimento média de $0,084 \text{ mm dia}^{-1}$ e na 3 fase $0,054 \text{ mm dia}^{-1}$. Durante a safra de 2014/2015 o diâmetro obteve na fase 1 uma taxa de crescimento médio de $0,14 \text{ mm dia}^{-1}$, na fase 2 a taxa média foi de $0,092 \text{ mm dia}^{-1}$ e na fase 3 a taxa média de $0,068 \text{ mm dia}^{-1}$. Na safra de 2015/2016 o diâmetro apresentou na fase 1 uma taxa de crescimento médio de $0,14 \text{ mm dia}^{-1}$, na 2 fase $0,092 \text{ mm dia}^{-1}$ e na 3 fase $0,07 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 3.9).

O aumento de diâmetro de colmos se dá de forma rápida nos primeiros 90 dias, estabilizando a partir dos 120 dias (Oliveira, 2010). Arantes (2012) analisando as cultivares RB867515, RB855536, SP83-2847 e SP80-1115 cultivadas em condições de sequeiro, o diâmetro foi observado foi inferior a 30 mm.

A quantidade de folhas verdes na cana-planta safra 2013/2014 apresentou maior número de folhas em 298 dias após o plantio (crescimento), de modo consequente índice de área foliar (IAF), no estágio de maturação a cultura apresentou declive na quantidade de folhas verdes e IAF (Figura 3.9). O número máximo de folhas verdes foi de 10 e o IAF médio de 5,87 para a safra de 2013/2014.

Na safra 2014/2015, 2ª soca da cultura de cana-de-açúcar o número máximo de folhas verdes foi de 12 folhas ocorridos em 168 dias após o corte (crescimento). Logo o IAF máximo registrado foi de 8 sucedido aos 210 dias após o corte. Na 3ª soca o número máximo de folhas verdes foi atingido em 207 dias após o corte (crescimento) com 10 folhas verdes. O IAF máximo para a safra de 2015/2016 foi de 8 aos 235 dias após o corte.

O acompanhamento da cultura baseado em análise de resultados agrometeorológicos e biométricos evidenciaram as condições do entorno que afetam a cana-de-açúcar em seu pleno desenvolvimento.

Segundo Santos et al. (2009) o comportamento do IAF da variedade RB 75126 em função de dias após o plantio ocorre um período de crescimento lento até os 60 dias, seguido de um período de crescimento rápido, dos 60 aos 120 dias, atingindo valores máximos, período de estabilização, ocorrendo dos 120 até os 300 dias após o plantio e, finalmente, um período de decréscimo a partir dos 300 dias, indicando o processo de maturação e concentração de sacarose.

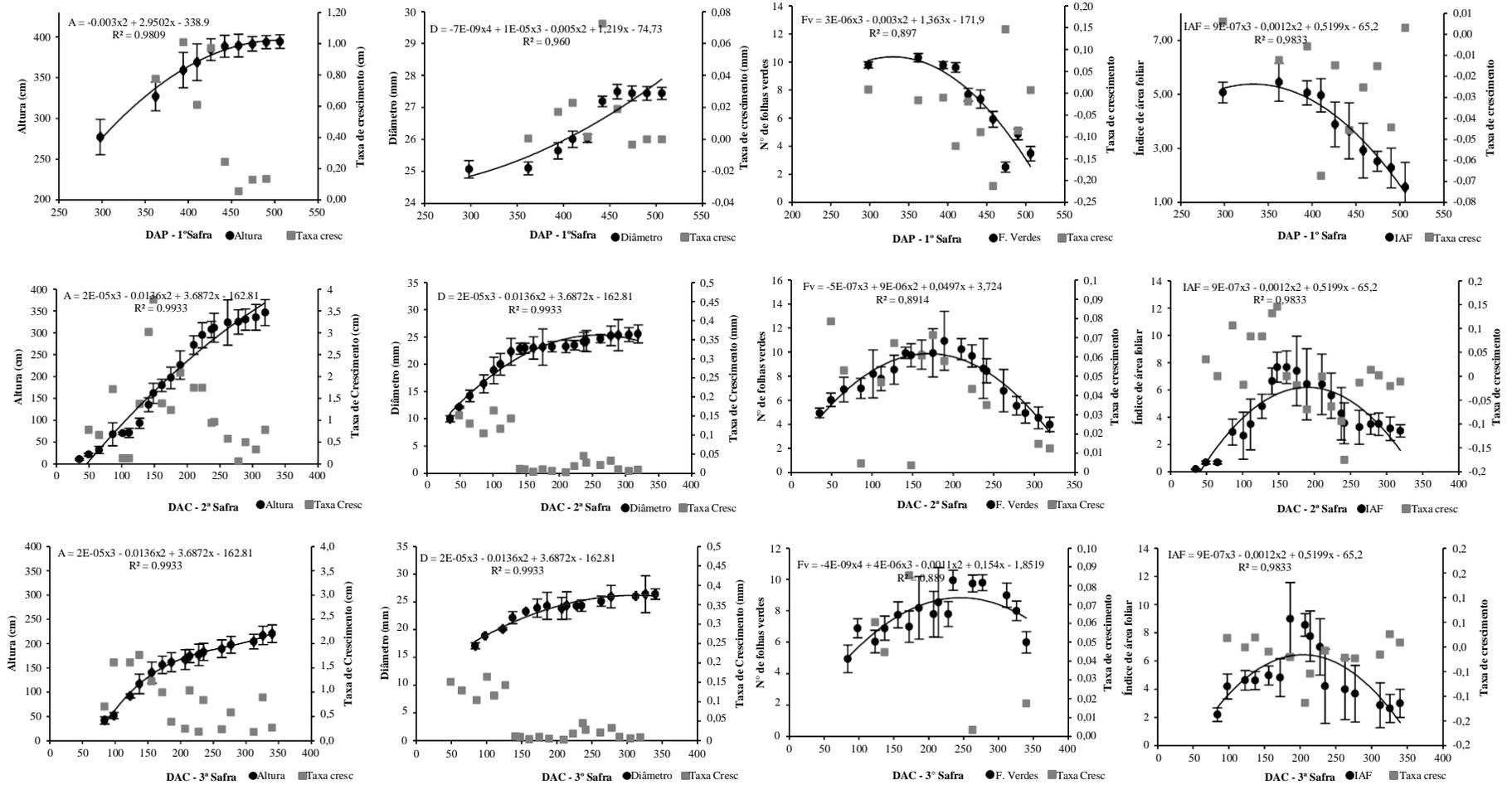


Figura 3.9 Análise de regressão da média da altura (cm), média do diâmetro (mm), média de número de folhas verdes e média do índice de área foliar (cm) e a taxa de crescimento da cana-de-açúcar, em função do tempo cultivada em Santo Antônio de Goiás nas safras 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.

A cana-de-açúcar necessita acumular um mínimo de energia (Graus-dia) para completar seu ciclo de desenvolvimento. Almeida et al. (2008) obtiveram valores de acumulado de graus-dia para a cana-planta e cana-soca em solo classificado com o Latossolo Amarelo coeso argissólico de textura média/argilosa para as variedades de SP78-1011, RB92579, RB93509 e RB931530, sendo para a 1ª fase (estabelecimento da cultura) 750 e 600 GD, na 2ª fase (crescimento rápido) ocorreram até 1500 e 950 GD e a fase final alcançou 2015 e 1800 GD, respectivamente.

Na cana-planta a altura máxima atingida ocorreu aos 458 DAC após um acumulado de ETR de 1.044 mm, amplitude térmica acumulada de 5.246 °C, graus-dia acumulada de 2.816 °C e graus-dia negativo de 358 °C. Durante o crescimento dos colmos (120 DAP a 340 DAP) na safra de 2013/2014 o déficit hídrico acumulado aumentou a uma taxa de 1,92 mm dia⁻¹. Confrontando as taxas de déficit hídrico e taxa de crescimento observou-se uma redução no crescimento de 0,023% a partir de uma lâmina acumulada de 539,08 mm (426 DAP). Na fase final de desenvolvimento, a maturação, foi registrado um déficit hídrico médio de 2,25 mm (Figura 3.10).

No período de grande crescimento de cana-planta na região de Paranavaí (PR) Oliveira et al. (2005) verificaram taxas de alongação do colmo de 1,6 cm dia⁻¹ na variedade RB855113; 1,8 cm dia⁻¹ na RB855536 e 2,0 cm dia⁻¹ na RB72454, atribuindo o efeito da redução na taxa de alongação ao aumento do auto-sombreamento durante o período de maturação.

Na safra 2014/2015, 1ª soca de cana-de-açúcar, altura máxima ocorreu aos 305 DAC ocorreu após um acumulado de 540,52 mm de ETR, graus-dia de 1.777°C e graus-dia negativo de 152°C (Figura 3.10). O déficit hídrico médio ocorrido na brotação (30 dias) e emergência foi de 1,90 mm e 0,12 mm no perfilhamento (80 dias). Na brotação o crescimento da cultura foi afetado pelo déficit hídrico, com o início do período chuvoso em novembro no estágio de perfilhamento houve um aumento no crescimento de 0,104 cm dia⁻¹. Durante o crescimento dos colmos ocorreu um déficit hídrico de 410,18 mm, quantidade inferior ao excedente hídrico que ficou em torno de 469,26 mm. O déficit hídrico ocorrido no estágio de crescimento não afetou no crescimento da altura conforme Figura 3.10. No estágio de maturação o déficit hídrico total foi de 229,71 mm.

Na safra 2015/2016, a cultura de cana-de-açúcar de 2ª soca obteve o ponto de máximo crescimento da altura dos colmos aos 340 dias após o corte, com um acumulado de

amplitude térmica de 3.958 °C. Durante a safra houve um registro total de ETR de 1.090,43 mm, com mínima registrada de 0,03 mm dia⁻¹, máxima de 4,06 mm dia⁻¹ e a média foi de 1,41 mm dia⁻¹. A altura máxima atingida da 2ª soca aos 340 DAC ocorreu com um acumulado de 477 de ETR, graus dia de 2.367 °C e graus-dia negativo de 172 °C. No terceiro ciclo de cultivo (2015/2016) de cana-de-açúcar registrou um déficit hídrico médio no estágio de brotação 0,70 mm, durante o perfilhamento o déficit médio foi de 0,22 mm, porém ocorreu um excedente médio de 1,39 mm anulando o efeito da deficiência hídrica neste estágio sendo favorável ao desenvolvimento da altura da cana-de-açúcar. Ao longo do estágio de crescimento ocorreu um déficit hídrico médio de 3,12 mm prejudicando o desenvolvimento da cana-de-açúcar com taxa de crescimento de 0,62 cm d⁻¹. No estágio de maturação da cana-de-açúcar o registro de déficit hídrico médio aumentou para 3,52 mm.

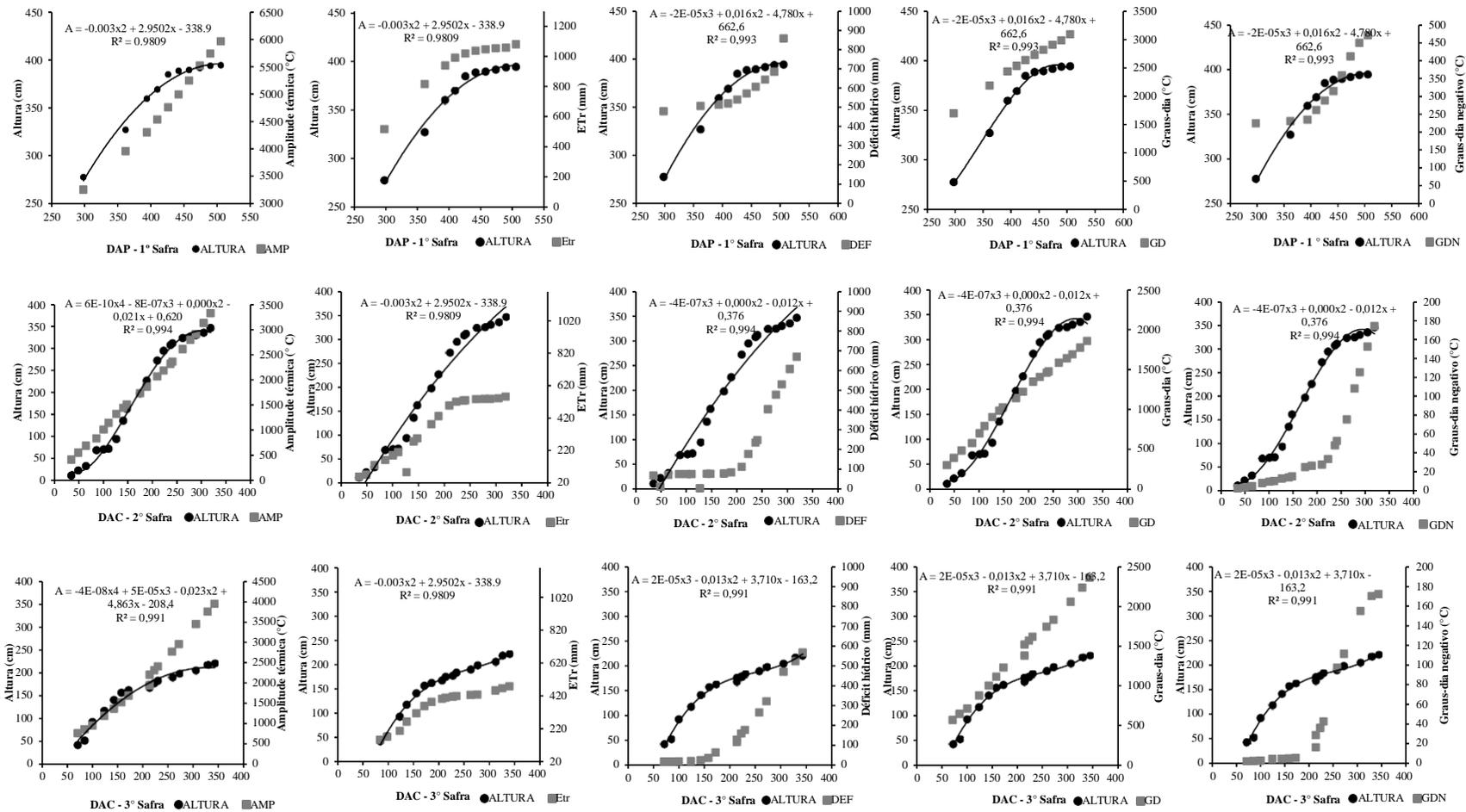


Figura 3.10 Análise de regressão da média da altura (cm) da cana-de-açúcar versus a amplitude térmica (°C), evapotranspiração real da cultura (ETr), déficit hídrico (mm), graus-dia (°C) e graus-dia negativo (°C), cultivada em Santo Antônio de Goiás nas safras 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.

O diâmetro é atributo biométrico influenciado pelo regime hídrico e também pode ser afetado pelo genótipo (Silva; Costa, 2004). Macedo et al. (2012) ao avaliarem a RB835486 e a RB867515 sob diferentes regimes hídricos, observaram que o DMC variou em função do ambiente e da variedade; também foi constatado que o maior potencial produtivo das variedades foi expresso em condições irrigadas.

O diâmetro atingiu seu máximo crescimento aos 490 DAP na safra de 2013/2014 em ciclo de cana-planta, com uma amplitude térmica acumulada de 5.739 °C, de ETR acumulada de 1.055 mm, graus-dia de 2.982°C e graus-dia negativo de 450 °C (Figura 3.11). Os resultados obtidos neste trabalho se aproximam dos resultados de Oliveira et al. (2004) com cana-planta em regime de sequeiro na região de Paranavaí (PR) que verificaram diâmetro de 30,4 mm para a variedade RB72454; 28,9 mm para a RB855113 e 27,3 mm para a RB855536, aos 377 DAP.

Na safra de 2014/2015 o diâmetro atingiu ponto de máximo desenvolvimento aos 127 DAC com uma amplitude acumulada de 1.317 °C, ETR acumulada de 230 mm, graus-dia de 904 °C e graus-dia negativo de 12 °C (Figura 3.11).

O diâmetro atingiu ponto de máximo desenvolvimento na safra 2015/2016 aos 214 DAC com uma amplitude acumulada de 2.207 °C, ETR acumulada de 407 mm, graus-dia de 1.522 °C e graus-dia negativo de 28 °C (Figura 3.11). O número de folhas verdes obteve seu ponto de máximo aos 207 DAC com uma amplitude acumulada de 1.947 °C, ETr acumulada de 401 mm, graus dia de 1.383 °C e graus-dia negativo de 16 °C (Figura 3.11).

Oliveira et al. (2014), avaliando dois cultivares de cana-de-açúcar (RB85-5453 e SP80-1816) em Latossolo Vermelho Distrofíco de textura média em Minas Gerais, observaram que o diâmetro variou entre 29,28 mm e 30,43 mm, valores esses próximos aos obtidos neste trabalho.

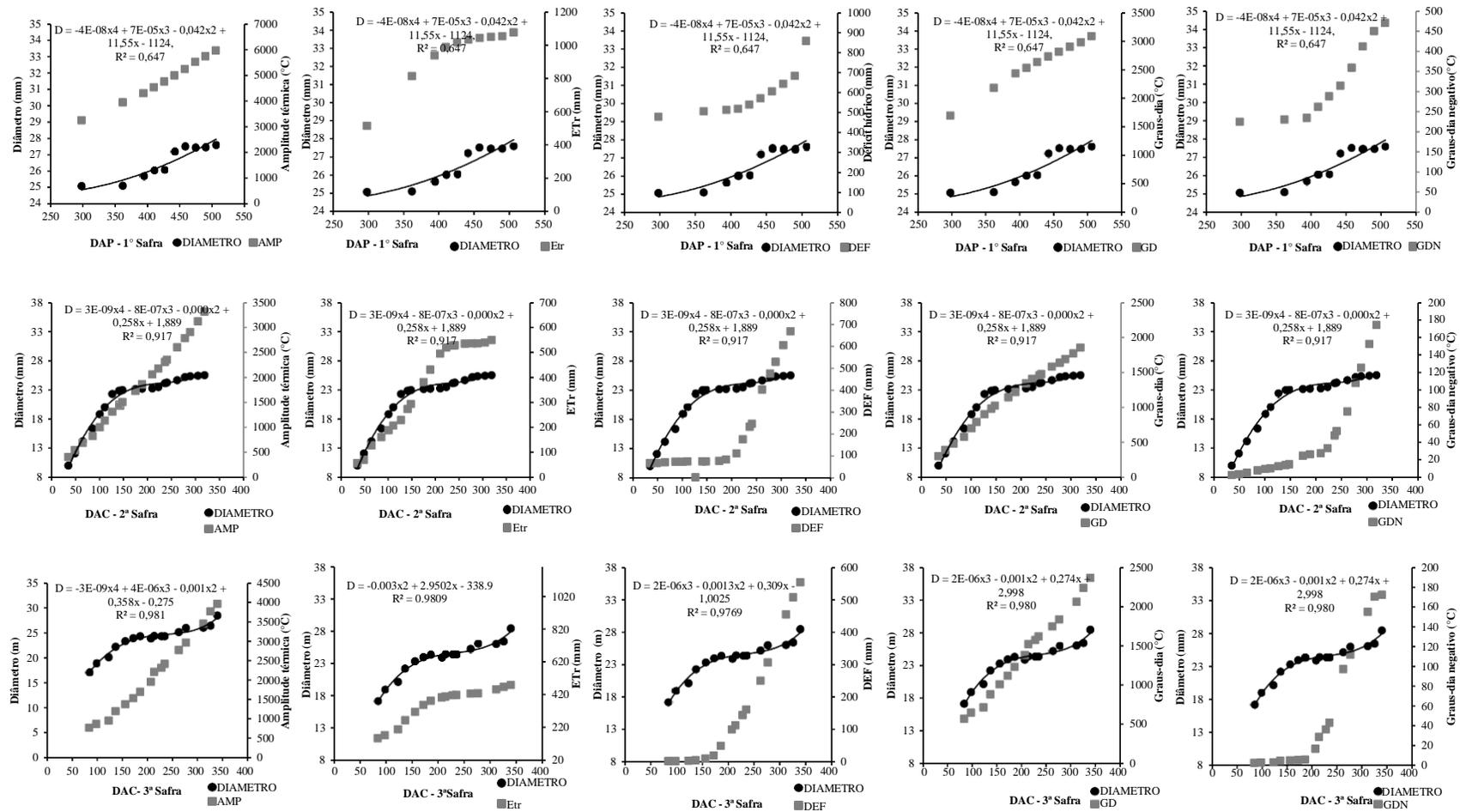


Figura 3.11 Análise de regressão da média do diâmetro da cana-de-açúcar versus a amplitude térmica, evapotranspiração real da cultura (ETr), déficit hídrico, graus-dia e graus-dia negativo cultivada em Santo Antônio de Goiás nas safras 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.

O número máximo de folhas verdes na safra de 2013/2014 ocorreu aos 298 DAP com uma amplitude térmica acumulada de 3.249 °C, acumulado de ETR de 515 mm, graus-dia de 1.696 e graus-dia negativo de 224 °C (Figura 3.12). O IAF (índice de área foliar) atingiu ponto máximo de crescimento aos 362 DAP com uma amplitude térmica acumulada de 3.952°C, com ETR acumulada de 815 mm, graus dia 2.184 °C e graus-dia negativo 230 °C (Figura 3.13).

Na segunda fase, o crescimento se mostrou rápido e linear e ocorreu entre os 750 e 1500 GD na cana-planta e entre 600 e 950 GD na cana-soca, na qual os IAF aumentaram de forma continuada até aproximadamente 3,5 na cana-planta e 4,5 na cana-soca. Essa fase foi responsável por 70% do crescimento total da cana, alcançando valores médios de 1,70 m de altura na cana-planta e 1,84 m na cana-soca (Almeida, 2008).

Arantes (2012) ao avaliar as variedades RB867515, RB855536, SP83-2847, SP89-1115 observou que os regimes hídricos contrastantes (irrigado e sequeiro) interferem no desenvolvimento e no crescimento foliar, o que influencia o IAF, e as variedades quando irrigadas apresentaram maior valor desse parâmetro.

O número de folhas verdes obteve seu ponto de máximo aos 175 DAC na safra de 2014/2015 com uma amplitude acumulada de 1.733 °C, ETR acumulada de 381 mm, graus-dia de 1.144 °C e graus-dia negativo de 24 °C (Figura 3.12). O IAF alcançou seu ponto de máximo aos 210 DAC com uma amplitude acumulada de 2.066 °C, ETr acumulada de 495 mm, graus-dia de 1.348 °C e graus-dia negativo de 27 °C (Figura 3.13).

Na safra de 2015/2016 o número de folhas verdes máximo atingiu aos 186 DAC, com uma amplitude acumulada de 1.693 °C, ETr acumulada de 381 mm, graus-dia de 1.231 °C e graus-dia negativo 5 °C (Figura 3.12). O IAF alcançou seu ponto de máximo aos 235 DAC com uma amplitude acumulada de 2.411 °C, ETr acumulada de 417 mm, graus-dia de 1.621°C e graus-dia negativo de 42 °C (Figura 3.13).

Zhao et al. (2010) em um estudo com a variedade CP 80-1743 conduzido em estufa no Canal Point, Flórida - EUA verificaram reduções de até 59% no IAF, devido a ocorrência de estresse hídrico em plantas de cana-de-açúcar, e ainda decréscimo de cerca de 69% na biomassa de folhas verdes.

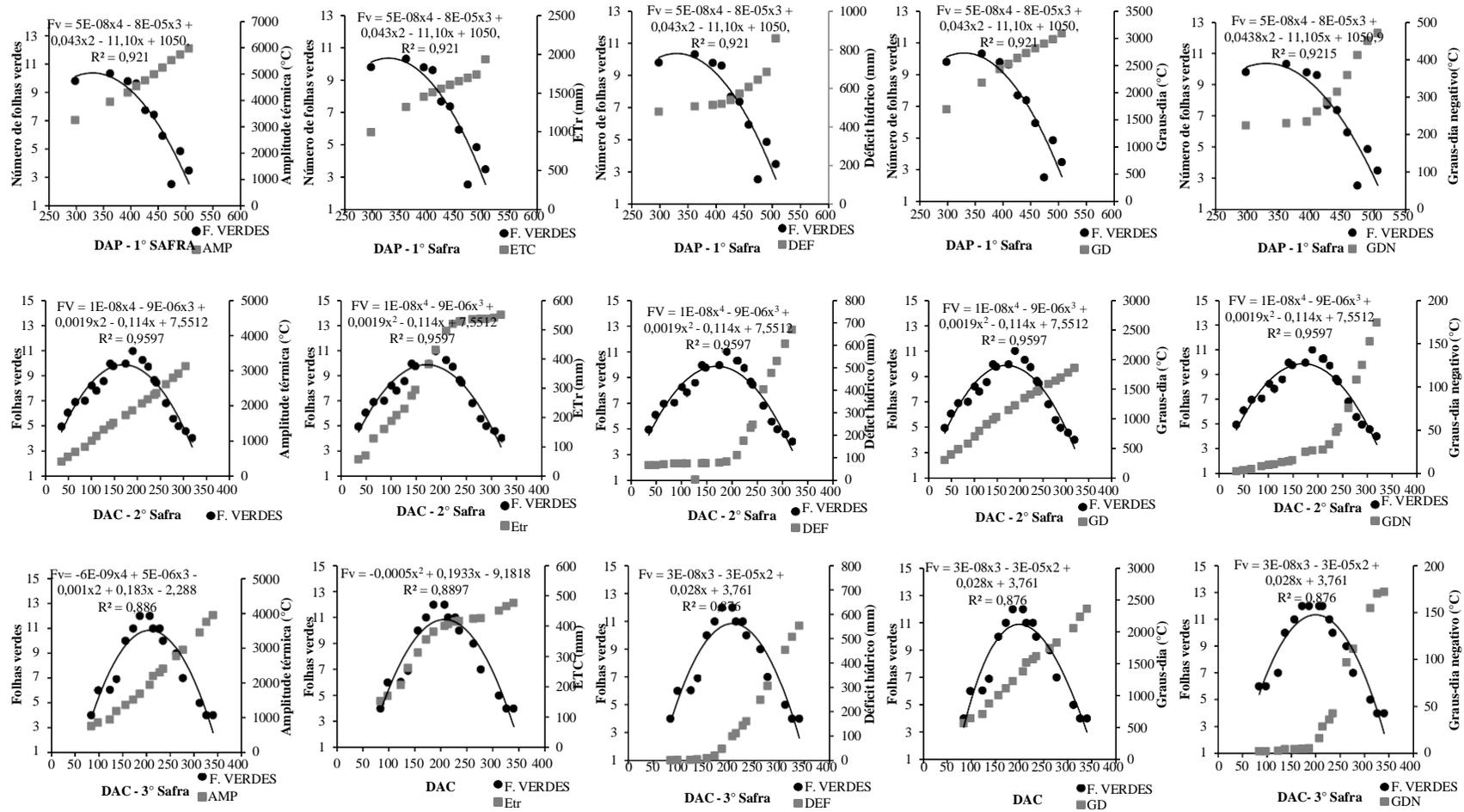


Figura 3.12 Análise de regressão da média do número de folhas verdes da cana-de-açúcar versus a amplitude térmica, evapotranspiração real da cultura (ETr), déficit hídrico, graus-dia e graus-dia negativo cultivada em Santo Antônio de Goiás nas safras 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.

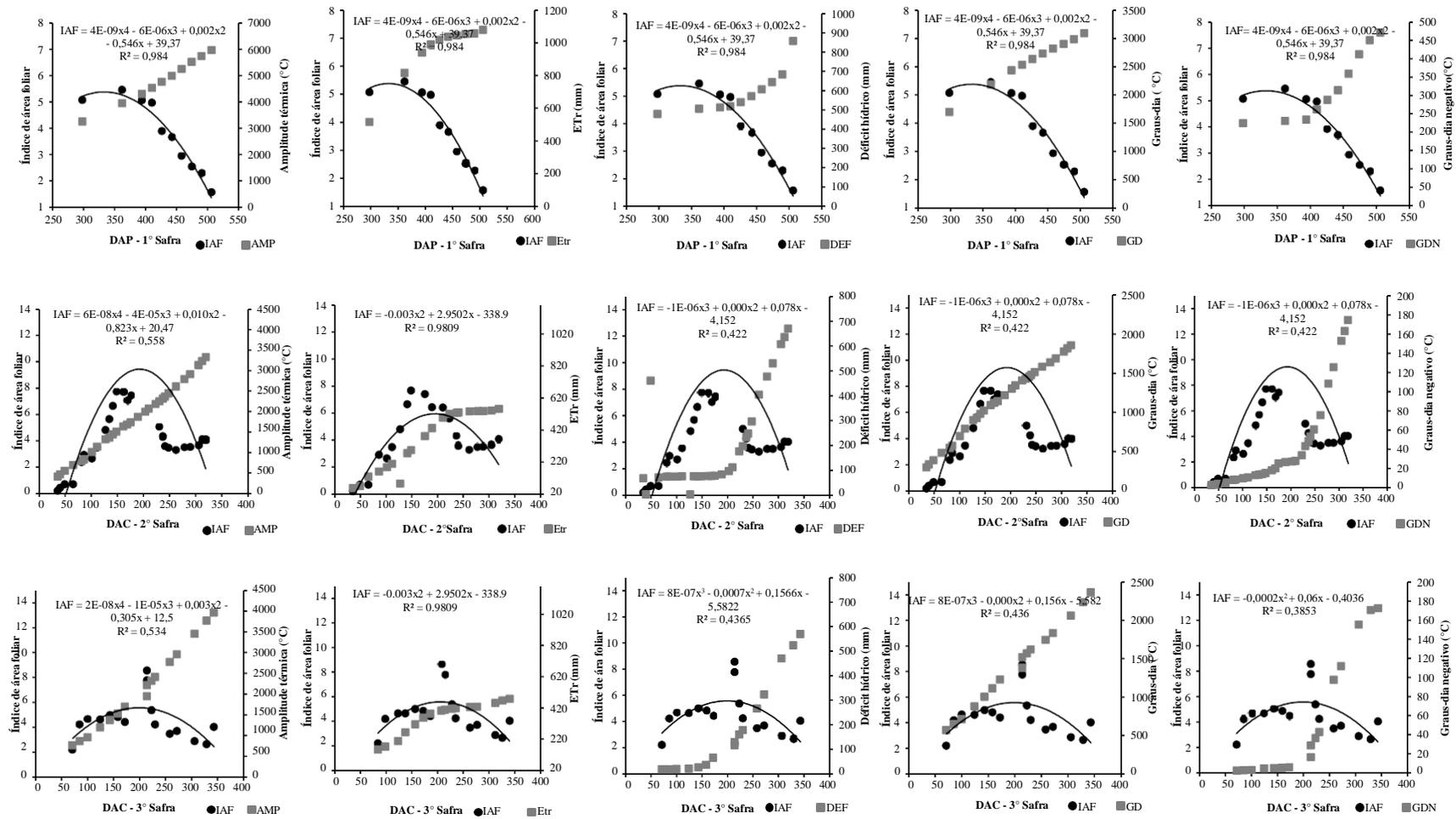


Figura 3.13 Análise de regressão da média do índice de área foliar da cana-de-açúcar versus a amplitude térmica (°C), evapotranspiração real (mm) da cultura (ETr), déficit hídrico (mm), graus-dia (°C) e graus-dia negativo (°C) cultivada em Santo Antônio de Goiás nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.

A produtividade da cana-de-açúcar, dada em toneladas por hectare, observada no experimento na safra de 2013/2014, constatou-se um erro sistemático com tendência a superestimativa da produtividade de 10% em relação à safra registrada na usina. Na safra de 2014/2015 ocorreu uma superestimativa da produtividade de 5% em relação à usina e na safra 2015/2016 a superestimativa da produtividade foi de 66% quando confrontada com a produtividade da usina. Teodoro et al. (2009), em um experimento de sequeiro com cana-planta na região de Rio Largo-AL, observou que, dentre as variedades cultivadas, a RB92579 foi a que mais produziu, atingindo 100 t ha⁻¹.

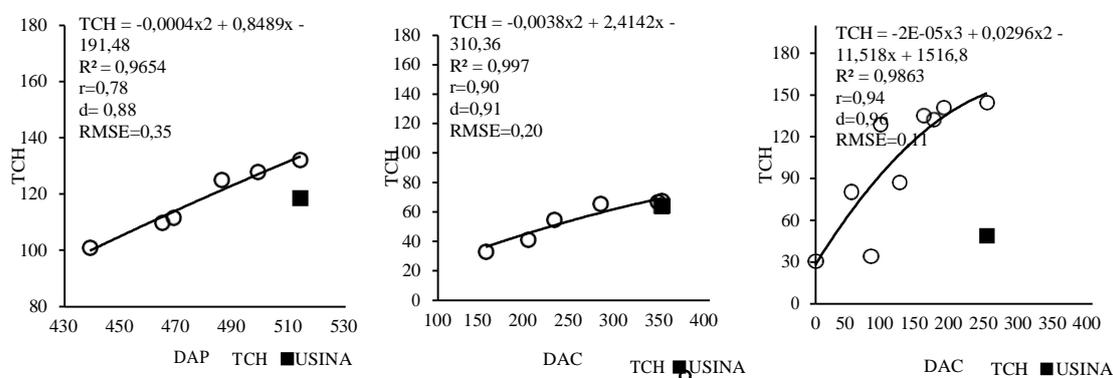


Figura 3.14 Toneladas de colmo por hectare observados no experimento e toneladas de colmo por hectare estimado pela usina após o corte de cana-de-açúcar cultivada em Santo Antônio de Goiás-GO nas safras 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.

A produtividade registrada na usina Centro álcool para a safra de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 foi de 118,65 t ha⁻¹, 64,15 t ha⁻¹ e 49,06 t ha⁻¹. Oliveira et al. (2012) observou produtividade de cana-de-açúcar em condições de sequeiro para a variedade RB 835486 em ciclo de cana-planta produtividade média de 107,4 t ha⁻¹ e primeira soca de 101,5 t ha⁻¹.

As produtividades dos ciclos de cana-planta, 1º e 2º soca correlacionam-se com os dados biométricos, agrometeorológicos e as variáveis do balanço hídrico da cultura. A análise de regressão demonstrou uma superestimação dos valores experimentais em relação ao obtidos na usina, mesmo assim, os índices estatísticos foram adequados para esta relação.

CONCLUSÃO

O comportamento biométrico da cana-de-açúcar cultivada em Santo Antônio de Goiás se comportou de maneira semelhante entre os ciclos e as fases fenológicas, com uma taxa média de altura dos colmos e diâmetro nas safras de 13/14, 14/15 e 15/16 de 0,49 cm dia, 0,022 mm, 1,14 cm dia 0,04 mm e 0,75 cm dia, 0,04 mm respectivamente. O número médio de folhas verdes foi de 7 folhas para safras 13/14 e 14/15 e 8 na safra 15/16.

O comportamento fenométrico da cultura de cana-de-açúcar apresentou que durante a fase 2 (crescimento) nas safras de 13/14 e 14/15 registrou os maiores valores de taxa de crescimento. Na safra 15/16 as maiores taxas de crescimento foram registradas durante a fase 1 (estabelecimento da cultura). A relação entre o comportamento biométrico e fenométrico com as variáveis climáticas, mostraram que a cultivar CTC-04 apresentou melhor tolerância ao déficit hídrico em ciclo de cana-planta.

Os resultados indicam que a integração de variáveis agrometeorológicas juntamente com medidas biométricas descrevem o comportamento da cultura da cana-de-açúcar que pode auxiliar na tomada de decisão em seu cultivo com antecedência.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, J. **Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estudio Riego e Drenaje Paper, 56).

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

ARANTES, M. T. **Potencial produtivo de cultivares de cana-de-açúcar sob os manejos irrigado e sequeiro**. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista Botucatu, Botucatu, 2012.

ARAÚJO, R.; ALVES JUNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P. Variation in the sugar yield in response to drying-off of sugarcane before harvest and the occurrence of low air temperatures. **Bragantia**, Campinas v. 75, n. 1, p.118-127, 2016.

AZEVEDO, H. M. **Resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros da Paraíba**. 2002. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais)-Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

BELL, M. J.; GARSIDE, A. L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2-3, p. 231-248, 2005.

BENICASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 42 p.

BONNETT, G. D.; HEWITT, M. L.; GLASSOP, D. Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 57, n. 10, p. 1087-1095, 2006.

CARLIN, S. D.; SILVA, M. A.; ROSSETO, R. Parâmetros biométricos e produtividade da cana-de-açúcar após tombamento dos colmos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 845-853, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, Agosto/2016**. Brasília, 2016. 70 p.

COUTINHO, L. M. O bioma do Cerrado. In: KLEIN, A. L. (Org.). **Eugen Warning e o Cerrado brasileiro**. São Paulo: UNESP, 2002. p. 77-92.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p.

FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M.; NETO, J. D. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.

FERREIRA JUNIOR, R. A. **Crescimento de variedades RB de cana-de-açúcar irrigadas e fotossíntese modelada pela radiação solar**. 2010. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2010.

GAVA, G. J. C.; KÖLLN, O. T.; URIBE, R. A. M.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H. Interação entre água e nitrogênio na produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). In: CRUSCIOL, C. A. (Org.). **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: FEPAF, 2010. v. 1, p. 49-66.

GILBERT, R. A.; SHINE JÚNIOR, J. M.; MILLER, J. D.; RAINBOLT, C. R. The effect genotype, environmental and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 95, n. 2-3, p. 156-170, 2006.

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

INMAN-BAMBER, N. G.; MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J. Dry partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, v.76, p.71-84, 2002.

KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling sugarcane production systems I: development in sugarcane, including sub optimum and supra-optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.90, p.119-139, 1999.

MACEDO, G. A. R.; COSTA, E. L., VIANA, M. C. M., FERREIRA, J. J.; PIRES, J. F.; FREIRE, F. M. Características agronômicas e químicas das variedades de cana-de-açúcar RB83-5486 e RB86-7515 sob irrigação e sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.6, p. 599-603, 2012.

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

OLIVEIRA, E. C. A.; OLIVEIRA, R. I.; ANDRADE, B. M. T.; FREIRE, F. J.; LIRA JÚNIOR, M. A.; MACHADO, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S.; SILVA, D. K. T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no estado do Paraná: Taxas de crescimento. **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 6, n. 1-2, p. 85-89, 2005.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; ZUFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S.; SILVA, D. K. T. 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.

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

OLIVEIRA, F. M.; AGUILAR, P. B.; TEIXEIRA, M. F. F.; ASPIAZÚ, I.; MONÇÃO, F. P.; ANTUNES, A. P. S. da. Características agrotecnológicas de cana-de-açúcar em diferentes épocas de supressão de irrigação e níveis de adubação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.35, n.3, p. 1587-1606, 2014.

PARK, S. E.; ROBERTSON, M.; INMAN-BAMBER, N. G. Decline in the growth of a sugarcane crop with age under high input conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2-3, p. 305-320, 2005.

REIS, G. G.; MULLER, M. W. **Análise de crescimento de plantas e mensuração do crescimento**. Belém: CPATU, 1979. 35 p.

SANTOS, V. R.; MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A. W.; COSTA, J. P. V.; SANTOS, C. G.; SANTOS, A. C. I. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar

em diferentes fontes de fósforo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 389-396, 2009.

SCARPARI, M. S.; BEAUC LAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2010. 882 p.

SILVA, A. L. C.; COSTA, W. A. J. M. Varietal variation in growth, physiology and yield of sugarcane under two contrasting water regimes. **Tropical Agricultural Research**, Peradeniya, v. 16, p. 1-12, 2004.

SILVA, S. C.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F.; AMORIM, A. O. **Informações meteorológicas para pesquisa e planejamento agrícola, referentes ao Município de Santo Antônio de Goiás, GO, 2012**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2014. 29 p.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; CARMO, J. F. A.; SOUZA, L. S. B. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no submédio do vale do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 500-509, 2012.

SILVA, S.; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; DANTAS NETO, J. Adaptação do método de Kc “dual” (FAO-56) para a cana-de-açúcar irrigada por gotejamento. **Revista ABEAS**, Brasília, v. 27, p. 87-93, 2012a.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; GOMES JÚNIOR, W. F. 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, 2012b.

SINGELS, A.; SMIT, M. A.; REDSHAW, K. A.; DONALSDON, R. A. The effect of crop star date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2-3, p. 249-260, 2005.

SOUZA, E. F.; BERNARDO, S.; CARVALHO, J. A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação à água para três cultivares, em Campo dos Goytacazes, RJ. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 19, n. 1, p. 28-42, 1999.

STONE, P. J.; SORENSEN, I. B.; JAMIESON, P. D. Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cooltemperature climate. **Field Crops Research**, v.48, p.169-178, 1999.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.104 p.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, Oxford, v. 11, n. 41, p. 41-76, 1947.

WILHELM, W. W.; McMASTER, G. S. Importance of the phyllochron in studying development and growth in grasses. **Crop Science**, Madison, v.35, n.1, p.1-3, 1995.

ZHAO, D.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J. C. Sugarcane response to water-deficit stress during early growth on organic and sand soils. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v.5, p.403-414, 2010.

4 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR A PARTIR DE MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS-ESPECTRAIS

RESUMO

A cana-de-açúcar desempenha um importante papel no mercado do agronegócio, onde o Brasil é o principal produtor. A metodologia aplicada para determinação de estimativa de safra constitui como uma importante informação para o planejamento do setor agrícola. O objetivo deste estudo foi estimar a produtividade da cana-de-açúcar a partir de dados biométricos, climáticos e espectrais no município de Santo Antônio de Goiás – GO. O experimento foi conduzido em uma área produtiva pertence à usina Centroálcool S.A., com a variedade de cana-de-açúcar CTC-04 de em ciclo médio tardio. O estudo foi realizado em ciclo de cana-planta e cana-soca (1° e 2° soca), referente às safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016, em área produtiva de 193 ha, em condições de sequeiro. Foram avaliadas as variáveis: altura, diâmetro, número de folhas verdes e índice de área foliar em relação ao tempo e as variáveis climáticas como: amplitude térmica, ETr, déficit hídrico, graus-dia, graus dia negativo e soma térmica. Os dados meteorológicos diários foram coletados da estação pluviométrica automática da EMBRAPA Arroz e Feijão – localizada no município de Santo Antônio de Goiás. A evapotranspiração foi obtida pelo método de Penman-Monteith padrão FAO, o balanço hídrico climatológico diário foi calculado pela metodologia proposta por Thornthwaite & Mather. A estimativa de produtividade da cultura de cana-de-açúcar foi obtida por quatro modelos: Zona Agroecológica (ZAE), modelo proposto por Scarpari, modelo proposto por Martins e Landell e o Agrometeorológico-Espectral. O balanço hídrico da cultura registrou nas safras 13/14, 14/15 e 15/16 um déficit hídrico acumulado de 857,91 mm, 772,38 mm, 599,81 mm respectivamente. Dentre os modelos analisados para estimar a produtividade de cana-de-açúcar o Agrometeorológico Espectral apresentou capacidade superior em relação aos demais para estimar a produtividade da cana-de-açúcar. Além disso a sua implementação possui baixo custo e permite que ao longo do cultivo se monitore as condições médias climáticas por estágio fenológico, identificando as perdas potenciais na produtividade provocadas pela deficiência hídrica.

Palavras-chave: balanço hídrico, modelo agrometeorológico, planejamento agrícola.

4 ESTIMATION OF SUGAR CANE PRODUCTIVITY FROM AGROMETEOROLOGICAL AND SPECTRUM MODELS

ABSTRACT

Sugarcane plays an important role in the agribusiness market, where Brazil is the main producer. The methodology used to determine harvest estimates constitutes important information for the planning of the agricultural sector. The objective of this study was to estimate sugarcane productivity from biometric, climatic and spectral data in the municipality of Santo Antônio de Goiás - GO. The experiment was carried out in a productive area belonging to the Centroalcool S.A. plant, with the CTC-04 sugarcane variety in the late middle cycle. The study was carried out in a cycle of cane-plant and cane-ratoon

(1st and 2nd ratoon), referring to the harvests of 2013/2014, 2014/2015 and 2015/2016, in a productive area of 193 ha, in dry conditions. The variables: height, diameter, number of green leaves and leaf area index in relation to time and climatic variables such as: thermal amplitude, ETr, water deficit, day degrees, negative day degrees and thermal sum were evaluated. The daily meteorological data were collected from the automatic rainfall station of EMBRAPA Arroz e Feijão - located in the municipality of Santo Antônio de Goiás. Evapotranspiration was obtained by the FAO standard Penman-Monteith method, the daily climatological water balance was calculated by the methodology proposed by Thornthwaite & Mather. The estimation of productivity of the sugarcane crop was obtained by four models: Agroecological Zone (ZAE), model proposed by Scarpari, model proposed by Martins and Landell and Spectral Agrometeorological. The water balance of the crop recorded in crop seasons 13/14, 14/15 and 15/16 an accumulated water deficit of 857.91 mm, 772.38 mm, 599.81 mm respectively. Among the models analyzed to estimate the sugarcane yield, Spectral Agrometeorological showed superior capacity in relation to the others to estimate sugarcane productivity. In addition, its implementation is low cost and allows throughout the crop to monitor the average climatic conditions by phenological stage, identifying the potential losses in productivity caused by water deficiency.

Key words: water balance, agrometeorological model, agricultural planning.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das culturas de maior importância na economia brasileira, devido à sua múltipla utilidade, podendo ser empregada in natura, sob a forma de forragem, para alimentação animal, ou como matéria prima para a fabricação de rapadura, melado, aguardente, açúcar e álcool. Seu resíduo (vinhoto) é transformado em adubo e o bagaço em combustível. Segundo o CEPEA é esperado para o ano de 2017 que a cultura de cana-de-açúcar apresente uma variação positiva no faturamento, reflexo nas cotações reais de 17,8%, na comparação entre janeiro a março de 2017 frente ao mesmo período de 2016.

Para a safra de 2016/2017 o Brasil possui 8.973 milhões de hectares de área plantada com uma produção estimada em 684.774 milhões de toneladas. Os Estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Alagoas, Mato Grosso e Pernambuco, representam 92,5% da produção nacional. Nos demais Estados produtores as áreas são menores e representam 3,3%. No contexto nacional, a região Centro-Oeste aumentou sua participação na produção canavieira. Com destaque para o Estado de Goiás que ampliou sua área plantada com cana-de-açúcar de 599 mil hectares na safra de 2010/2011 para 931 mil hectares na safra de 2015/2016, alcançando o segundo maior índice de produtividade de cana-de-açúcar no país (CONAB, 2016).

Diante da crescente demanda dos mercados interno e externo pela produção de biocombustíveis e considerando a expansão da produção de cana-de-açúcar em diversas regiões do País, torna-se fundamental obter informações relacionadas à produção dessa commodity para auxiliar na gestão estratégica, tanto na escala local, quanto regional (Andrade et al., 2014). O acompanhamento das culturas agrícolas ao longo de sua estação de crescimento auxilia no manejo, planejamento estratégico, visando maximizar a produção, reduzindo riscos ao longo do ciclo e também possibilita a estimativa da produtividade antes da colheita (González-Sanpedro et al., 2008). A estimativa da produtividade é de interesse relevante ao poder público e empresas privadas por proporcionar um planejamento de políticas de mercado, otimizando a tomada de decisão das empresas quanto à logística de colheita, armazenamento e escoamento da produção (Andrade et al., 2014).

No Brasil, as estimativas oficiais de produtividade agrícola são realizadas predominantemente por métodos tradicionais de coleta de informações, mediante entrevistas aplicadas aos produtores, observações de campo, informações sobre a venda de insumos, análise de safras passadas, observação das condições meteorológicas, o que não permite uma análise estatística dos erros que comprometem as estimativas do volume de produção de álcool e açúcar. Assim, torna-se crescente a demanda por métodos objetivos e de fácil implementação para obtenção dessas estimativas, que relacionem a variação meteorológica aos fatores que afetam o desenvolvimento das culturas agrícolas e sua produtividade (Rizzi & Rudorff, 2007).

Sabe-se que a variabilidade climática sempre foi um dos principais fatores na determinação dos riscos às atividades agrícolas, pois o desempenho da agricultura apresentar dependência das condições de temperatura e umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica, radiação solar, vento (Maciel et al, 2009).

Nesse cenário, tem-se desenvolvido modelos que procuram expressar os efeitos das variações climáticas sobre o crescimento de culturas e, conseqüentemente, sobre a produtividade agrícola. Dentre os modelos de simulação de produtividade em função do clima tem-se destaque para o Método da Zona Agroecológica (ZAE), desenvolvido por Kassam (Fischer et al., 2002; Doorenbos & Kassam, 1979), sendo uma forma muito precisa para este tipo de estimativa (Tubiello et al., 2007). Além disso, esta produtividade potencial pode ser penalizada pelo déficit hídrico, (Gouvêa et al., 2009; Marin et al., 2008).

Além do ZAE, outros modelos também foram descritos para estimar a produtividade da cana-de-açúcar para condições locais, tais como: Scarpari, 2002; Marin *et al* 2008; Lapola *et al.*, 2009; Cuadra *et al.*, 2012, dentre estes destaca-se o modelo proposto por Scarpari (2002), que por trabalhar com as variáveis precipitação pluvial e temperatura do ar, torna-se alternativa de previsão de produtividade da cana-de-açúcar nas condições climáticas.

O sensoriamento remoto constitui meio rápido e eficiente na aquisição de informações sobre a superfície terrestre, tornando-se uma ferramenta valiosa para monitorar as condições da vegetação e produção de biomassa (Mantovani & Pereira, 1998). Em geral, para monitoramentos que visam estimar e prever a produtividade da safra em escala regional, são utilizados sensores com alta resolução temporal e baixa resolução espacial (Atzberger, 2013; Rembold *et al.*, 2013), que permitem caracterizar os estágios fenológicos dos cultivos e detalhar a variação espectral da vegetação ao longo do tempo. Assim, inclusão de uma componente espectral a esses modelos gera os modelos agrometeorológicos-espectrais e permite que outras variáveis que influenciam a produtividade, tais como práticas de manejo e tipo de cultivar, sejam contempladas (Melo *et al.*, 2008).

O objetivo deste estudo foi comparar quatro diferentes métodos para a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar cultivada nas condições climáticas do bioma Cerrado no município de Santo Antônio de Goiás-GO.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram coletados em área experimental, localizada no município de Santo Antônio de Goiás-GO (16°29'8" S; 49°20'36" W; 780 m), referentes aos anos-safra 2013/2014 (cana-planta), 2014/2015 (cana - 1ª soca) e 2015/2016 (cana - 2ª soca). Segundo a classificação climática de Köppen, a região possui clima do tipo Aw (tropical de savana), caracterizado por inverno seco (maio-outubro) e verão chuvoso (setembro-abril).

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado em abril de 2013, adotando-se o sistema de plantio semi-mecanizado, com mudas pré-brotadas, em espaçamento de 1,50 m, utilizando a variedade CTC-04, classificada como ciclo médio-tardio. O estudo foi realizado em ciclo de cana-planta e cana-soca (1º e 2º soca), referente às safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016, em área produtiva de 193 ha, o cultivo foi realizado em condições de sequeiro. A colheita de cana-de-açúcar também foi feita manualmente, sendo que o

primeiro corte ocorreu no dia 03/10/2014, o segundo corte em 30/09/2015 e o terceiro em 15/10/2016.

O experimento foi realizado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura média (270 g kg⁻¹ de argila, 130 g kg⁻¹ de silte e 600 g kg⁻¹ de areia). 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). Foram feitas aplicações de herbicidas para o controle de plantas daninhas de folhas largas, nas quantidades recomendadas pelo fabricante.

Foram demarcadas na área cinco unidades experimentais compostas por 5 linhas de 15 m de comprimento, espaçadas a 1,50 m. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (área homogênea), com cinco repetições.

Os modelos foram gerados a partir das características biométricas e tecnológicas das plantas e de variáveis climáticas, obtidas em escala mensal.

Os dados meteorológicos diários foram coletados da meteorológica automática da EMBRAPA – Arroz e Feijão, localizada no município de Santo Antônio de Goiás. A distância entre o posto meteorológico em questão e a área experimental 7,0 km da área de estudo. A distância da estação meteorológica está em conformidade com os padrões do guia de instrumentos meteorológicos e métodos de observação da Organização de Meteorologia Mundial (OMM), onde instrui que a estação meteorológica possui uma representatividade de um raio de 100 km em torno da estação, mas para aplicações em pequena escala ou locais, a área considerada pode ter dimensões de 10 km ou menos (WMO-Nº8, 2008). Os dados coletados em escala diária ao longo do experimento foram temperaturas máximas e mínimas (°C), precipitação (mm), umidade relativa do ar (%), velocidade média do vento a 2 m de altura (m s⁻¹), radiação solar global e saldo de radiação (MJ m⁻²d⁻¹).

As avaliações de crescimento, desenvolvimento e produtividade foram realizadas desde o plantio até a colheita, sendo:

vi) Fitomassa seca da parte aérea (FSPA) - foram coletadas amostras de colmos e folhas de 10 colmos, procedendo à secagem em estufa de ventilação forçada a 65°C, durante um período de 10 dias (massa constante), sendo posteriormente pesadas em balança digital e os resultados expressos em g planta⁻¹;

vii) Altura de colmos: foram medidas em cinco perfilhos ou colmos, com auxílio de uma fita métrica, medindo a distância do solo até a inserção da folha +1, sendo utilizada como padrão de altura de plantas (Silva et al., 2012);

viii) Número de perfilhos – foram contabilizados o número de perfilhos por metro linear, amostrando-se um comprimento de 5 m lineares, procedendo-se posteriormente o cálculo do número médio de perfilhos por m².

ix) Diâmetro de colmo - mensurado com o auxílio de um paquímetro, realizada na base dos colmos, próximo a superfície do solo.

x) Área foliar (AF, cm²) - mediu-se o comprimento (C, cm) e a largura máxima da folha +3 (L, cm) e contabilizou-se o número de folhas verdes ($\geq 20\%$ de área verde), conforme metodologia descrita por Hermann & Câmara (1999) na Equação 1:

$$AF = (C \cdot L \cdot 0,75) \cdot (N + 2) \quad [1]$$

sendo 0,75 o fator de correção para área foliar da cultura. vi) índice de área foliar (IAF, m² m⁻²) obtido a partir da razão entre a AF por perfilho, do número de perfilhos por metro linear (NP, m⁻²), e a superfície do solo (S, m²) (Watson, 1947) conforme a Equação 2:

$$IAF = \frac{AF \cdot NP}{S} \quad [2]$$

vii) taxa de crescimento da cultura (TCC, g dia⁻¹) – contabilizada pela variação da fitomassa seca acumulada pela planta em um intervalo de tempo ($t_f - t_i$) (Reis & Muller, 1979; Benicasa, 1988):

$$TCC = \frac{(FS_f - FS_i)}{(t_f - t_i)} \quad [3]$$

em que FS_i é a fitomassa seca inicial e FS_f a fitomassa seca final, obtida após um intervalo de tempo, t_i é a quantidade de dias transcorridos desde o plantio ou corte até a o dia da amostragem, e t_f o tempo da última amostragem do intervalo.

viii) Fitomassa de colmo (FMC) – contabilizada a partir da média da pesagem de 10 colmos por parcela (kg).

ix) Número de colmos por metro (NC) – contabilização do número de colmos das duas linhas centrais de cada parcela, dividindo-se pelo número de metros lineares.

x) Tonelada de colmo por hectare (TCH) - estimado em função da massa média dos colmos da parcela e do número total de colmos presentes nas respectivas parcelas e um fator que é em função do espaçamento de plantio, conforme evidencia a seguinte equação: $TCH = M1C \cdot NCM \cdot (100/1,5) \cdot (100/1000)$. Sendo que 1,5 refere-se ao espaçamento entre linhas, 100 refere-se aos metros lineares de um hectare, e 1000 é a correção de quilos para toneladas.

Foram utilizados quatro modelos de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar:

i) Método da Zona Agroecológica (ZAE) ou Modelo FAO (Doorenbos & Kassam, 1979).

O método ZAE calcula a produção potencial de biomassa em função da temperatura do ar, da irradiância solar e da duração do ciclo da cultura. A produtividade potencial foi penalizada utilizando-se coeficiente de sensibilidade da produtividade ao déficit de umidade no solo K_y (Tabela 4.1). A produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar (PP) representa o nível de referência de produtividade atingível com alto padrão de manejo da cultura e água, em que não há limitação de clima, água e nutrientes e sem ataque de pragas e doenças (Doorenbos & Kassam, 1979). O método ZAE determina PP (kg ha^{-1}) por meio da Equação 4:

$$PP = C_{IAF} \cdot C_r \cdot C_c \cdot C_{UM} \cdot N_D \cdot [F \cdot (a + b \cdot PP_P) \cdot PB_n + (1 - F) \cdot (c + d \cdot PP_P) \cdot PB_c] \quad [4]$$

Em que PP é a produtividade potencial ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), PP_P a produção fotossintética bruta de matéria seca de uma cultura padrão ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$); C_{IAF} é a correção para o índice de área foliar existente (caso $IAF < 5$, então $C_{IAF} = 0,0093 + 0,185 IAF - 0,0175 IAF^2$; mas se $IAF \geq 5$, então $C_{IAF} = 0,5$), que visa ajustar o índice de área foliar da cultura de cana-de-açúcar a uma condição mais próxima da realidade; C_r é um coeficiente de correção para a respiração da cultura, adotando-se $C_r = 0,6$ para $T < 20^\circ\text{C}$ e $C_r = 0,5$ para $T \geq 20^\circ\text{C}$; C_{Col} (índice de colheita) que relaciona a matéria seca economicamente rentável e a massa seca total produzida, adotando-se para a cana $C_c = 0,75$; C_{UM} é a correção de umidade residual na matéria seca da parte rentável (cana $C_{UM} = 0,8$); e N_D é a duração do ciclo de crescimento (dias). Os valores de a, b, c, d são iguais a 0,8; 0,1; 0,5 e 0,025 respectivamente (Fischer et al., 2002; Doorenbos & Kassam, 1979).

A fração do dia com nebulosidade (F) foi calculada durante todo o ciclo da cultura pela Equação 5:

$$F = \left(\frac{R_{so} \cdot 0,5 \cdot R_s}{0,8 \cdot R_{so}} \right) \quad [5]$$

em que: R_{so} – irradiância solar na superfície para dias claros ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) R_s – irradiância solar global à superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Durante o dia ocorrem, com bastante frequência, períodos de nebulosidade, a PP é composta de um componente relativo ao período nublado PB_n ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e outro ao período de céu claro PB_c ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). Deste modo, a PB_c e a PB_n são calculada diariamente, durante todo o ciclo da cultura, sendo as equações:

$$PB_n = 31,653 + 0,5477 \cdot R_{so} \quad [6]$$

$$PB_c = 104,66 + 0,9061 \cdot R_{so} \quad [7]$$

A taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão (PPB_p) é considerada como tendo o valor de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$; entretanto, a produção da matéria seca depende da cultura e da temperatura do ar (T_{ar} , °C). Assim, os valores de PPB_p para a temperatura do ar para o intervalo de 5°C a 45°C , conforme proposto por Fischer et al. (2002) e Dorrenbos e Kassam (1979), seguem:

$$5^\circ\text{C} \leq T_{ar} \leq 10^\circ\text{C}; PPB_p = 0 \quad [8]$$

$$10^\circ\text{C} < T_{ar} \leq 15^\circ\text{C}; PPB_p = t - 10 \quad [9]$$

$$15^\circ\text{C} < T_{ar} \leq 25^\circ\text{C}; PPB_p = -0,397 \cdot t^2 + 21,916 \cdot T_{ar} - 236,52, R^2 = 0,99 \quad [10]$$

$$25^\circ\text{C} < T_{ar} \leq 35^\circ\text{C}; PPB_p = 65 \quad [11]$$

$$35^\circ\text{C} < T_{ar} \leq 45^\circ\text{C}; PPB_p = 0,350 \cdot t^2 + 21,972 \cdot T_{ar} - 276,40, R^2 = 0,99 \quad [12]$$

No cálculo da produtividade limitada pela disponibilidade hídrica constata-se que a evapotranspiração máximas da cultura (ET_c) é relacionada com a evapotranspiração de referencia (ET_o) por meio de um coeficiente de cultura (K_c), conforme Equação 13:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad [13]$$

A evapotranspiração de referência foi calculada pela Equação 14 de Penman-Montheith (Allen et al., 2006):

$$ET_o = \frac{0,408 s (Rn - G) + \frac{900 U_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + (1 + 0,34 U_2)} \quad [14]$$

Sendo s a declividade da curva de pressão parcial de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), estimada a partir de $(4098e_s)/(237,3+T)^2$, R_n o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), G_o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), γ_a constante psicrométrica ($0,063 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), T_a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), U_2 a velocidade do vento a 2,0 m de altura (m s^{-1}), e_s e e_a são, respectivamente, a pressão de vapor de água na saturação e atual (kPa), estimadas a partir do seguinte conjunto de equações:

$$e_s = (e_s T_{\max} + e_s T_{\min}) / 2 \quad [15]$$

$$e_s T = 0,611 * 10^{[(7,5 * T)/(237,3 + T)]} \quad [16]$$

$$e_a = (UR_{\text{med}} * e_s) / 100 \quad [17]$$

$$UR_{\text{med}} = (UR_{\max} + UR_{\min}) / 2 \quad [18]$$

$$T = (T_{\max} + T_{\min}) / 2 \quad [19]$$

O fluxo de calor no solo (G) foi calculado a partir da diferença entre a temperatura média diária (T_{md}) e a temperatura média dos três dias anteriores ($T_{3\text{md}}$), pela Equação 20, descrita por Silva et. al, (2011):

$$G = 0,38(T_{\text{md}} - T_{3\text{md}}) \quad [20]$$

Onde T_{\max} é a temperatura máxima do ar ($^\circ\text{C}$), T_{\min} a temperatura mínima do ar ($^\circ\text{C}$), UR_{\max} a umidade máxima do ar (%), UR_{\min} a umidade mínima do ar (%).

Para a estimativa do balanço hídrico sequencial diário adotou-se o procedimento proposto por Thornthwaite & Mather (1955), calculado em planilha eletrônica. Para isto, foi determinada a capacidade de água disponível (CAD, mm) pela seguinte Equação 21:

$$CAD = \left(\frac{\theta_{CC-P}}{100} \right) \cdot Z_e \quad [21]$$

em que θ_{CC} e θ_{PMP} são as respectivas umidades volumétricas do solo correspondentes a Capacidade de Campo (0,39) e o Ponto de Murcha Permanente, PMP (0,24). Aprofundidade efetiva do sistema radicular Z_e , dada pela média de exploração de 80% das raízes, foi utilizada o valor de 0,60 m de profundidade, conforme determinado em cana-de-açúcar em cultivo de condição de sequeiro (Farias et al., 2008).

A taxa diária de produtividade potencial foi obtida pela relação entre a produtividade potencial do mês e o número de dias do mês em questão. A produtividade deplecionada, ou seja, quando a produtividade real (PR, $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) deixa de ser potencial ($PR < PP$) devido ao déficit hídrico, foi estimada pela Equação 22:

$$PR = PP \cdot \left[1 - K_F \cdot \left(1 - \frac{ETR}{ET_c} \right) \right] \quad [22]$$

Sendo a ETR a evapotranspiração real (mm dia^{-1}), e ETc a evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}) e o k_y o fator de sensibilidade ao déficit hídrico da cultura, em cada estágio fenológico conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (k_y) calibrados para a cultura da cana-de-açúcar em diferentes períodos de desenvolvimento.

Fonte: Santos et al. (2006).

Estádio Fenológico	Cana planta e Cana soca precoce	Cana soca média	Cana soca tardia
Brotação e estabelecimento	0,75	0,80	0,70
Período de grande crescimento vegetativo	0,75	0,80	0,70
Formação de colheita	0,50	0,70	0,50
Maturação	0,10	0,30	0,10

O método de estimativa de produtividade Zona Agroecológica (ZAE) foi calculado com os dados observados na área experimental de cana-de-açúcar e também foram calculados com os dados propostos por Doorenbos & Kassam (1994) e Barbieri & Tuon (1992) sob condições irrigadas proposta para cana-de-açúcar. Foram utilizados o índice de colheita ($C_c=0,80$) e o teor de umidade (%) 80.

ii) Modelo de Scarpari (2002): agroclimático de previsão de colmos de cana-de-açúcar por hectare (TCH) que considera as variáveis como precipitação, graus-dias e graus-dias negativo dos cinco meses anteriores a colheita, conforme (Equações 23 e 24):

$$TCH = 35,72306 + 0,57487 \cdot mm1 + 0,22957 \cdot mm2 + 0,29839 \cdot mm4 + 0,89310 \cdot mm5 - 0,34098 \cdot Gd4 \quad [23]$$

$$TCH = 64,21145 + 0,27273 \cdot mm4 \quad [24]$$

em que mm_n é a precipitação do “enésimo” mês anterior à colheita do talhão (mm), e Gd_n são os graus-dia no “enésimo” mês anterior à colheita do talhão ($^{\circ}\text{C}$). Os graus-dia variam em função da temperatura média do ar e da temperatura basal da cultura (Equações 25 e 26):

Para $TM > Tb > Tm$, tem-se:

$$Gd = \frac{(TM-Tb)^2 + (TM-Tm)^2}{2 \cdot (TM-Tm)} \cdot f \cdot NDM \quad [25]$$

E para $Tb < Tm$:

$$Gd = Tm - Tb + \frac{(TM-Tm)}{2} + \frac{(TM-25)^2}{2 \cdot (TM-T)} \cdot f \cdot NDM \quad [26]$$

onde TM e Tm são as temperaturas máximas e mínimas mensal (°C), respectivamente; Tb a temperatura basal da cana-de-açúcar, Tb = 20 °C (Barbieri *et al.*, 1979); f é um fator função do fotoperíodo (N, horas) determinado pela Equação 27:

$$f = \left(\frac{N}{24} - N \right)^2 \quad [27]$$

e NDM o número de dias do mês.

iii) O Modelo Agrometeorológico-Espectral

O modelo agrônômico utilizado neste trabalho foi inicialmente proposto por Doorenbos & Kassam (1979) e está fundamentado no efeito da deficiência hídrica sobre a produtividade agrícola. A quantificação deste efeito se dá através do somatório da relação entre a evapotranspiração real e a potencial (ETR/ETP) e de um fator de resposta à produtividade (ky) que relaciona a deficiência hídrica com a demanda de água pela cultura nos diferentes estádios fenológicos para a formação da produtividade agrícola. Esse modelo foi escrito em linguagem FORTRAM por Rudorff (1985) e mais tarde implementado por Berka *et al.* (2003) em um Sistema de Informação Geográfica (SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Com a possibilidade de se estimar o índice de área foliar (IAF) a partir de imagens de sensoriamento remoto o modelo passou a revelar aspectos relevantes para estudos em escalas regionais (Rizzi & Rudorff, 2007). A entrada da variável espectral no modelo da FAO (nº 33) ajustado por Rizzi (2004) ocorreu através do cálculo da produtividade máxima ou potencial (Y_p), ao estimar o parâmetro fator de compensação do crescimento (F_{cc}), conforme apresenta a Equação 28:

$$Yp = Fcc \cdot Fr \cdot Fpa \cdot ND \cdot PMB \quad [28]$$

onde:

Y_p: produtividade máxima potencial (kg ha⁻¹);

F_{cc}: fator de compensação do crescimento;

Fr: fator de respiração;

F_{pa}: fator de produtividade agrícola;

ND: número de dias do mês;

PMB: produção de matéria seca bruta do grupo da cultura.

As variáveis meteorológicas requeridas pelo modelo de estimativa de produtividade são: temperatura média do ar (°C); velocidade do vento a 2 m de altura (km dia⁻¹); umidade relativa do ar (%); radiação solar (W m⁻²) e precipitação pluvial (mm dia⁻¹) foram obtidas da estação meteorológica automática da EMBRAPA – Arroz e Feijão, situada no município de Santo Antonio de Goiás – Go.

Para representar no modelo a variabilidade espacial do vigor vegetativo dos talhões de cana-de-açúcar, foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT-8 para estimar o índice de área foliar através do NDVI (Índice de Vegetação Normalizada), variável espectral de entrada no modelo agrônomico. A base de dados espectrais foi obtida a partir de imagens Landsat 8/OLI, do banco de dados do sistema Earth Explorer (earthexplorer.usgs.gov), disponibilizadas gratuitamente, com a seleção de cenas entre as datas de plantio (abril/2013) a colheita (Outubro/2016) da cana-de-açúcar. Estas imagens consistem em arquivos digitais no formato raster (.tiff) quantificados em valores de número digital ou nível de cinza (DN) com intervalo de aquisição de 16 dias, resolução espacial de 30 m, cada cena recobre uma área no terreno com dimensões de 185 x 185 km. Os dados em DN foram então convertidos em reflectância no topo da atmosfera (TOA) a partir da utilização de coeficientes de redimensionamento radiométricos, fornecidos no arquivo de metadados disponibilizado juntamente com as imagens (USGS 2013). A localização das cenas acontece por meio da identificação do número da órbita/ponto. Para a área de estudo foram adquiridas as cenas correspondentes a órbita/ponto 222/71.

Os dados foram agregados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) utilizando o software QGIS 2.14, georreferenciados no Datum SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico das Américas) e sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator).

Após estimar o NDVI proveniente do Landsat - 8 para as safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 foram aplicados para estimar a fração da cobertura do solo (Fc), adaptado do método proposto por Choudhury et al. (1994), conforme a Equação 29:

$$F_c = 1 - \left(\frac{NDVI_{max} - ND}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0,9} \quad [29]$$

em que, $NDVI_{max}$ é o valor máximo do NDVI da imagem, $NDVI_{min}$ é o valor mínimo do NDVI da imagem e $NDVI$ é o valor do pixel para o qual está sendo calculado o valor de F_c .

O Índice de Área Foliar (IAF) foi estimado pela Equação 30, seguindo a metodologia sugerida por Norman et al. (2003).

$$IAF = -2Ln(1 - Fc) \quad [30]$$

O modelo agrônômico utiliza o IAF para o cálculo da produtividade através do fator de compensação do crescimento (Fcc), que por sua vez independe do tipo da cultura, como indica a Equação 31, ajustada por Berka et al. (2003), com base em Doorenbos & Kassam (1979):

$$Fcc = 0,515 - e(-0,667 - (0,515 * IAF)) \quad [31]$$

sendo os valores de IAF obtidos a partir da Equação 29.

Além dos dados já citados, alguns parâmetros específicos da cultura da cana-de-açúcar foram necessários para que o modelo agrônômico fosse executado, tais como: o coeficiente de cultura (kc) conforme proposto na (Tabela 3.2), o fator de resposta à produtividade (ky) conforme proposto (Tabela 4.1). Tais parâmetros tiveram seus valores ajustados de acordo com o desenvolvimento da planta no estágio fenológico.

O fator de produtividade agrícola (FPA), outro parâmetro do modelo, possui um elevado peso no cálculo da estimativa da produtividade e tem o mesmo valor para todo o ciclo da cultura, independentemente do ano safra. O modelo estima a produtividade com base na matéria seca total da planta, e o FPA é multiplicado pelo valor de produtividade obtido em cada mês. Neste trabalho, o valor do FPA utilizado foi 2,9, com base no trabalho de Rudorff (1985). A soma das produtividades parciais em cada mês corresponde ao valor da produtividade final estimada.

Foi feita uma análise de correlação nos dados de IAF observados no campo com o IAF obtido com os dados espectrais para ver a influência significativa dessas variáveis no cálculo da produtividade final da cultura da cana-de-açúcar.

iv) Martins & Landell (1995): determina a produtividade estimada do canavial, em toneladas de colmos por hectare (TCHe t ha⁻¹) a partir da Equação 32:

$$TCHe = D^2 \cdot NPI \cdot EMC \cdot \left(\frac{0,007854}{ESP} \right) \quad [32]$$

em que, D o diâmetro dos colmos (cm), NPI o número de perfilhos industrializáveis por metro linear, EMC a estatura média dos colmos (cm), ESP o espaçamento entre sulcos (m), 0,007854 o fator de correção apropriado para cana-de-açúcar. Para determinar a TCHe são considerados os dados médios referentes à uma ou mais avaliações.

Para verificar o desempenho dos modelos foi realizado o cálculo do coeficiente de Peason “*r*” que mede o grau de correlação, este coeficiente assume valores entre -1 e 1.

O RMSE, MAE e MBE são medidas de erros usados para representar as diferenças médias entre os valores preditos pelo modelo (P) e os valores observados (O). o RMSE fornece uma informação em relação a dispersão dos dados, ou seja, o grau de espalhamento obtido na correção entre valores preditos e observados. O MAE é menos sensível a valores extremos. O MBE informa o quanto os valores preditos susperestimam ou subestimam os valores observados.

O RMSE, o MAE e o MBE são calculados, respectivamente, por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad [33]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad [34]$$

em que *n* é o número de observações.

A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados e foi dada estatisticamente pelo índice de concordância “*d*” proposto por Willmott et al. (1985), mostrando a distancia dos dados observados e estimados em relação a reta 1:1. Seus valores variam de zero para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice é dado pelo Equação 35:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (F_i^F - F_i)^2}{\sum ([F_i^F - F] + [F_i - F])^2} \right] \quad [35]$$

Em que o Y'_i é o valor estimado, o Y_i o valor observado e o Y é a média dos valores observados.

Segundo Camargo & Sentelhas (1997), os seguintes indicadores estatísticos foram considerados para correlacionar os valores estimados com os medidos: exatidão – índice de Willmott “*d*” e de confiança ou desempenho “*c*”. O índice “*c*” é calculado conforme Equação 36:

$$c = r \cdot d \quad [36]$$

Conforme valor encontrado na equação 36, eles são classificados numa escala conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Classificação do desempenho dos métodos de estimativa da produtividade agrícola pelo índice c. Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

Valores de c	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do balanço hídrico da cultura calculado com os dados diários de 01/04/2013 a 16/10/2016, compreendendo as safras da cultura de cana-de-açúcar de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016, observa-se que há um total de precipitação de 1.609,20 mm, 1.390,20 mm e 1.230,20 mm por safra, respectivamente, para a região de Santo Antônio de Goiás-Go. Durante as safras analisando o balanço hídrico apontou uma deficiência hídrica na safra de 2013/2014 de 857,91 mm. Na safra de 2014/2015 o déficit hídrico total foi de 716,66 mm. Na safra de 2015/2016 o déficit hídrico foi de 593,87 mm (Figura 4.1).

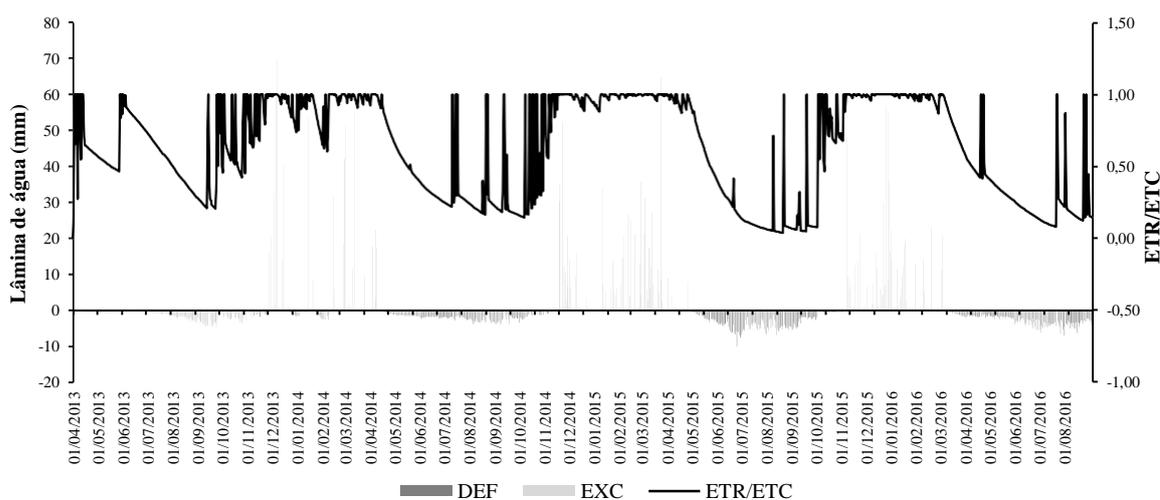


Figura 4.1 Excedente hídrico (EXC), deficiência hídrica (DEF) e razão entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração da cultura (ETR/ETc) do balanço

hídrico realizado no município de Santo Antônio de Goiás-GO das safras 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.

Quando os valores de $E_{Tr}/E_{Tc} < 1,0$ indicam que o sistema solo-planta não foi capaz de suprir a demanda hídrica atmosférica, sendo possível verificar períodos de restrição hídrica valores de $E_{Tr}/E_{Tc} < 1,0$ durante a estação seca, conforme demonstrado na Figura 4.1 no eixo secundário. Na safra de 2013/2014 em ciclo de cana-planta os valores de E_{Tr}/E_{Tc} no estágio de brotação (50 DAP) foi em média para o período 0,74 mm. Durante o estágio de perfilhamento (120 DAP) a média foi de 0,34 mm, no crescimento (340 DAP) a média 0,69 mm e na maturação (480 DAP) a média foi de 0,31 mm.

Na safra de 2014/2015 em ciclo de 1ª soca os valores de E_{Tr}/E_{Tc} em média durante o estágio de brotação (30 DAC) foi de 0,23 mm, no perfilhamento (80 DAC) 0,94 mm, no crescimento (260 DAC) 0,36 mm e na maturação (320 DAC) 0,074 mm.

Na safra 2015/2016 em ciclo de 2ª soca ocorreu durante o estágio de brotação (30 DAC) uma média de E_{Tr}/E_{Tc} de 0,65 mm, no perfilhamento (80 DAC) 0,93 mm, no crescimento (260 DAC) 0,15 mm e na maturação (320 DAC) 0,24 mm.

O consumo de água da planta é semelhante à evapotranspiração da cultura (E_{Tc}), a qual é definida como a perda de água por evaporação do solo e transpiração das plantas. O conhecimento da E_{Tc} é muito importante em projetos de irrigação, pois ela representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento da cultura. Conforme Nieuwenhuis et al. (2012), quanto mais a evapotranspiração real da cultura (E_{Tr}) for próximo da evapotranspiração máxima da cultura (E_{Tc}) menor é o estresse sofrido pela cultura.

A tabela 4.3 apresenta a demanda hídrica da evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) para cada estágio fenológico da cultura de cana-de-açúcar nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 juntamente com a evapotranspiração real (E_{Tr}).

Ao longo da brotação na safra de 2013/2014 a E_{Tr} acumulada neste estágio esteve 23,02% abaixo da E_{Tc} . No perfilhamento a E_{Tr} acumulada foi de 68,72% inferior. Durante o estágio de crescimento a E_{Tr} acumulada foi de 30,39% menor que a E_{Tc} e na maturação a E_{Tr} esteve 68,66% abaixo da E_{Tc} (Tabela 4.3).

Na safra de 2015/2016 durante o estágio de brotação a E_{Tr} esteve 83,77% abaixo da E_{Tc} . No perfilhamento a E_{Tr} acumulada foi de 5,35% inferior em relação a E_{Tc} .

No crescimento a ETR acumulada foi de 69,63% inferior a ETc e no estágio de maturação o acumulado de ETR foi 92,36% inferior a ETc (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 Evapotranspiração da cultura (ETc) e evapotranspiração real (ETR) acumulada (mm) ocorrida em cada estágio fenológico da cultura de cana-de-açúcar cultivada em Santo Antonio de Goiás – Go nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015.

Safras	Brotação		Perfilhamento		Crescimento		Maturação	
	ETc	ETR	ETc	ETR	ETc	ETR	ETc	ETR
13/14	89,99	69,27	224,44	71,22	1.111,50	773,75	508,50	159,36
14/15	68,20	11,07	366,60	346,97	589,10	178,92	248,70	19,01
15/16	56,00	39,56	385,75	342,93	410,85	51,13	236,11	56,94

Na safra de 2015/2016 durante o estágio de brotação a ETR ocorrida foi 29,36% abaixo da ETc. No estágio de perfilhamento o acumulado de ETR 11,10% inferior a ETc. No crescimento a ETR acumulada foi 96,24% inferior a ETc. No estágio de maturação a ETR acumulada foi 75,88% inferior a ETc (Tabela 4.3).

A deficiência hídrica na cultura de cana-de-açúcar foi mais acentuada no estágio de crescimento (Tabela 4.4). Durante a brotação na safra 2013/2014 o déficit ocorrido representou 2,41% do total ocorrido. No estágio de perfilhamento o déficit hídrico foi de 17,87%, no crescimento foi 39,06% e na maturação foi de 40,74%.

Tabela 4.4 Deficiência hídrica acumulada (mm) ocorrida em cada estágio fenológico da cultura de cana-de-açúcar cultivada em Santo Antonio de Goiás – Go nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015.

Safras	Brotação	Perfilhamento	Crescimento	Maturação
2013/2014	20,73	153,21	334,75	349,21
2014/2015	57,11	19,66	410,18	229,71
2015/2016	20,29	38,07	355,95	179,57

Na safra de 2014/2015 o déficit hídrico registrado no estágio de brotação representou 7,96%, perfilhamento foi de 2,74%, crescimento 59,93% e maturação foi de 32,05% do total de deficiência hídrica ocorrida na cultura de cana-de-açúcar 1º soca. Na safra de 2015/2016 o registro de deficiência hídrica no estágio de brotação da cultura de

cana-de-açúcar representou 3,41%, no perfilhamento foi 6,41%, no crescimento foi 59,93% e na maturação foi 30,23% (Tabela 4.4).

Na Figura 4.2 são apresentadas as produtividades potenciais e reais estimadas para a variedade CTC- 04 tanto em ciclo de cana-planta como para a 1ª e 2ª cana-soca das safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 com as informações obtidas no experimento simuladas pelo método da Zona Agroecológica (ZAE). No estágio de brotação e perfilhamento durante a safra de 2013/2014 a produtividade real foi 14,2% inferior a produtividade potencial, esta quebra na produtividade foi ocasionada pelo 173,94 mm de déficit hídrico ocorrido neste estágio fenológico (Tabela 4.4) com taxa média de crescimento de 0,27 t ha⁻¹ dia⁻¹ e 175 °C graus-dia acumulados. No crescimento da cultura da cana-de-açúcar o déficit hídrico acumulado de 334,75 mm representou uma quebra na produtividade de 27,8%, a taxa média de crescimento foi de 0,26 t ha⁻¹ dia⁻¹ e 718 °C graus-dias acumulados. No estágio de maturação o déficit hídrico acumulado de 349,21 causou uma quebra na produtividade de 4,6%, a taxa média de crescimento foi de 0,33 t ha⁻¹ dia⁻¹ e 1.733 °C graus-dia acumulados. Na safra de 2013/2014 o modelo de estimativa de produtividade ZAE preveu uma produtividade real final da cultura de cana-de-açúcar de 78,11 t ha⁻¹ dia⁻¹.

Na safra de 2014/2015 a produtividade real estimada pelo modelo ZAE no estágio de brotação e perfilhamento apresentou uma quebra de 7% comparada com a produtividade potencial esperada, causado pela deficiência hídrica de 76,77 mm, a taxa de crescimento média foi de 0,26 t ha⁻¹ dia⁻¹. No estágio de crescimento a quebra na produtividade foi de 27% acarretado pelo 410,18 mm de déficit hídrico acumulado neste período, a taxa de crescimento foi de 0,21 t ha⁻¹ dia⁻¹. Na maturação a quebra de produtividade foi de 25% com um déficit hídrico acumulado de 229,71 mm, com taxa de crescimento de 0,25 t ha⁻¹ dia⁻¹. A produtividade real final obtida pelo modelo ZAE na safra de 2014/2015 foi de 45,06 t ha⁻¹.

Oliveira (2010) avaliou o modelo ZAE na cultura de cana-de-açúcar em 30 experimentos na região do Triângulo Mineiro que melhor representa a produtividade média da variedade RB835486 para o ciclo da cana-planta o método ZAE simula altas perdas devido ao déficit hídrico nos experimentos 1 (Destilaria Agropeu), 7 (Usina Passos) e 13 (Usina Trialcool), sendo estas perdas de 74,9%, 72,5% e 70,9%. Para o ciclo de cana-soca as perdas são estimadas para os experimentos 27 (Usina Trialcool), 22 (Destilaria DW) e 21 (Destilaria DW), sendo 47,3%, 49,2% e 49,2% respectivamente.

Na safra de 2015/2016 a produtividade real estimada pelo modelo ZAE no estágio de brotação e perfilhamento apresentou uma quebra de 3%, causado pelo déficit hídrico de 58,36 mm, a taxa de crescimento neste estágio foi de $0,46 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. No estágio de crescimento a quebra na produtividade foi de 40% ocasionada pela deficiência hídrica de 355,95 mm, a taxa de crescimento foi de $0,26 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. No estágio de maturação a quebra registrada foi de 12%, ocorrida devido um déficit hídrico de 179,57 mm, a taxa de crescimento foi de $0,24 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A produtividade final registrada pelo modelo ZAE com os dados obtidos no canavial para a safra de 2015/2016 foi de $47,50 \text{ t ha}^{-1}$.

Silva et al. (2014), avaliaram o potencial produtivo de diferentes variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento durante dois ciclos em Jaú, SP, e observaram que a IAC91-1099 se destacou positivamente em termos de produtividade, apresentando no segundo corte produtividade superior a 115 t ha^{-1} para o ciclo de um ano.

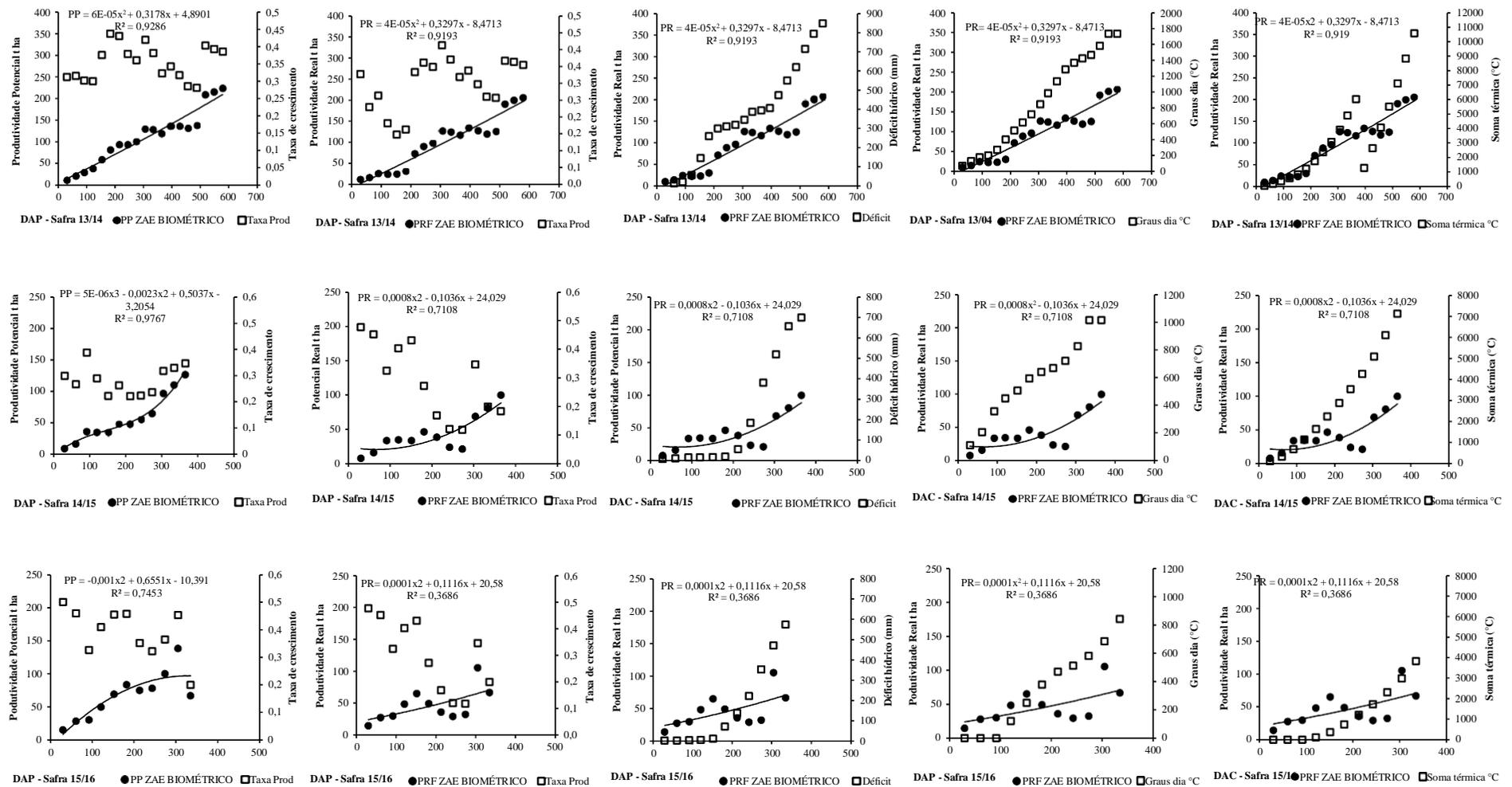


Figura 4.2 Produtividade potencial (PP), produtividade real (PR) estimada de cana-de-açúcar pelo método da Zona Agroecológica (ZAE) com os dados obtidos no canavial para as safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 no município de Santo Antônio de Goiás-GO.

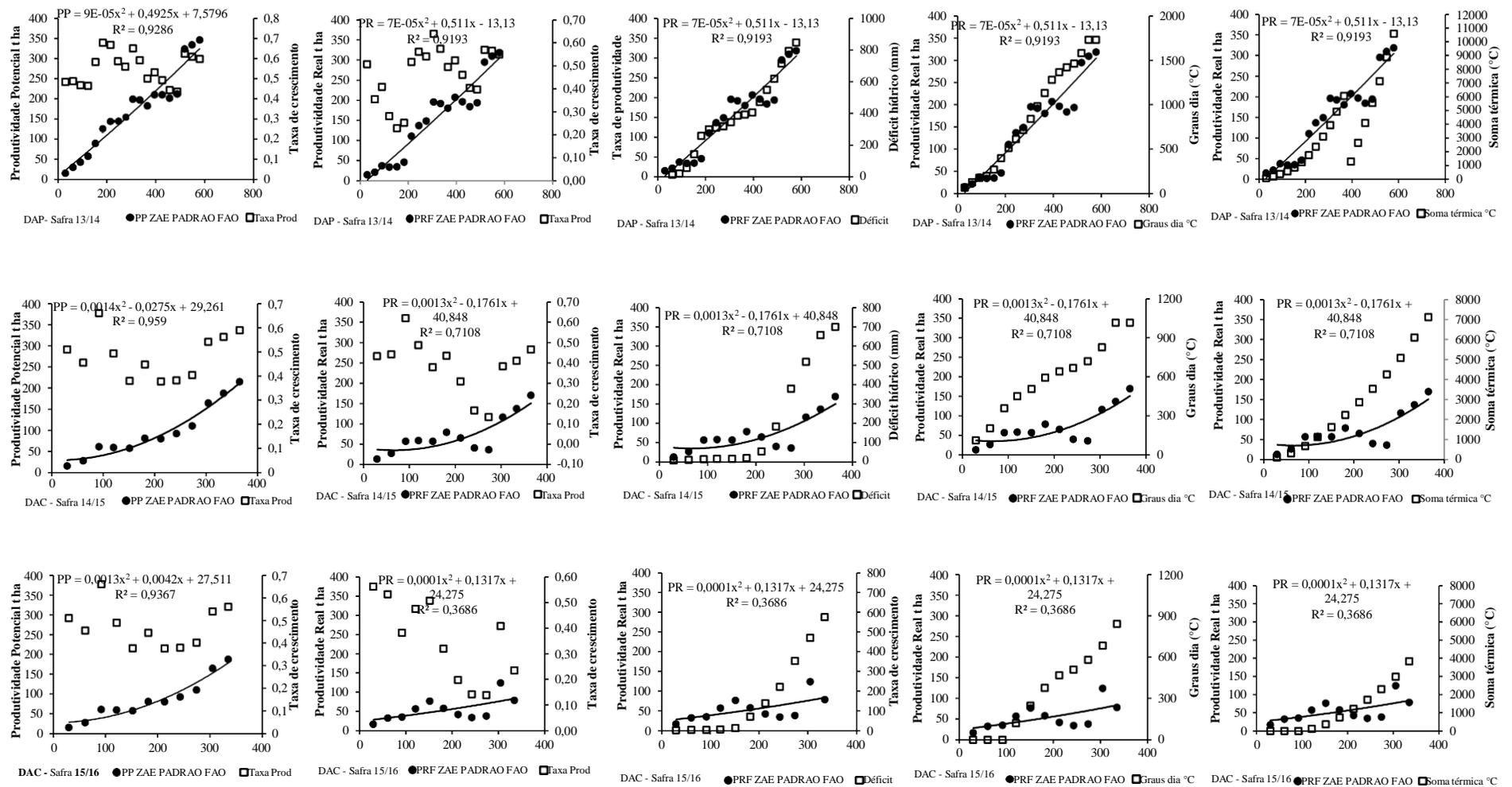


Figura 4.3 Produtividade potencial (PP), produtividade real (PR) estimada de cana-de-açúcar pelo método da Zona Agroecológica (ZAE) com os dados tabelado da FAO para as safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 no município de Santo Antônio de Goiás-GO.

Na Figura 4.3 são apresentadas as produtividades potenciais e reais estimadas em ciclo de cana-planta como para a 1ª e 2ª cana-soca das safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 com as informações tabeladas pela FAO. Na safra de 2013/2014 em ciclo de cana-planta o estágio de brotação e perfilhamento a produtividade real foi 14,6% inferior a produtividade potencial, esta quebra na produtividade foi ocasionada pelo 173,94 mm de déficit hídrico ocorrido neste estágio fenológico (Tabela 4.4) com taxa média de crescimento de 0,42 t ha⁻¹ dia⁻¹ e 175 °C graus-dia acumulados. No estágio de crescimento a cana-de-açúcar manteve-se sob o déficit hídrico acumulado de 334,75 mm representou uma quebra na produtividade de 27,8%, com taxa média de crescimento de 0,40 t ha⁻¹ dia⁻¹ e 718 °C graus-dias acumulados. No estágio de maturação o déficit hídrico acumulado de 349,21 mm que causou uma quebra na produtividade de 5,8%, a taxa média de crescimento foi de 0,52 t ha⁻¹ dia⁻¹ e 1.733 °C graus-dia acumulados. Na safra de 2013/2014 o modelo de estimativa de produtividade ZAE obtido com os dados tabelados pela FAO preveu uma produtividade real final da cultura de cana-de-açúcar de 121,08 t ha⁻¹ dia⁻¹.

Na safra de 2014/2015 a produtividade real estimada pelo modelo ZAE no estágio de brotação e perfilhamento apresentou uma quebra de 7%, causado pelo déficit hídrico de 58,36 mm, a taxa de crescimento neste estágio foi de 0,44 t ha⁻¹ dia⁻¹. No estágio de crescimento a quebra na produtividade foi de 27% ocasionada pela deficiência hídrica de 355,95 mm, a taxa de crescimento foi de 0,36 t ha⁻¹ dia⁻¹. No estágio de maturação a quebra registrada foi de 25%, ocorrida devido um déficit hídrico de 179,57 mm, a taxa de crescimento foi de 0,42 t ha⁻¹ dia⁻¹. A produtividade final registrada pelo modelo ZAE com os dados obtidos no canavial para a safra de 2015/2016 foi de 76,60 t ha⁻¹.

Carvalho (2009) ressalta que o efeito do estresse hídrico depende da fase fenológica e da intensidade do estresse hídrico, a cultura pode recuperar-se após um período de deficiência, produzindo tanto quanto em áreas que não exprimem essa deficiência hídrica.

Na safra de 2015/2016 a produtividade real estimada pelo modelo ZAE no estágio de brotação e perfilhamento apresentou uma quebra de 3%, causado pelo déficit hídrico de 58,36 mm, a taxa de crescimento neste estágio foi de 0,55 t ha⁻¹ dia⁻¹. No estágio de crescimento a quebra na produtividade foi de 40% ocasionada pela deficiência hídrica de 355,95 mm, a taxa de crescimento foi de 0,31 t ha⁻¹ dia⁻¹. No estágio de maturação a quebra registrada foi de 12%, ocorrida devido um déficit hídrico de 179,57 mm, a taxa de crescimento foi de 0,29 t ha⁻¹ dia⁻¹. A produtividade final registrada pelo modelo ZAE com os dados obtidos no canavial para a safra de 2015/2016 foi de 56,03 t ha⁻¹.

Carvalho (2009) calibrou o método ZAE para a estimativa das produtividades potencial e real para cana-soca, em função de dados meteorológicos e da disponibilidade de água nos solos no Estado de São Paulo entre as safras de 1990/1991 a 2005/2006 obtendo valor de $R^2=0,60$.

Na Figura 4.4 são apresentadas as produtividades potenciais e reais estimadas em ciclo de cana-planta como para a 1ª e 2ª cana-soca das safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 com o modelo Agrometeorológico Espectral. Na safra de 2013/2014 em ciclo de cana-planta o estágio de brotação e perfilhamento a produtividade real foi 36,2% inferior a produtividade potencial, esta quebra na produtividade foi ocasionada pelo 173,94 mm de déficit hídrico ocorrido neste estágio fenológico (Tabela 4.3) com taxa média de crescimento de $0,40 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $175 \text{ }^\circ\text{C}$ graus-dia acumulados. No estágio de crescimento a cana-de-açúcar manteve-se sob o déficit hídrico acumulado de 334,75 mm representou uma quebra na produtividade de 27,8%, com taxa média de crescimento de $0,37 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $718 \text{ }^\circ\text{C}$ graus-dias acumulados. No estágio de maturação o déficit hídrico acumulado de 349,21 mm que causou uma quebra na produtividade de 5,8%, a taxa média de crescimento foi de $0,49 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $1.733 \text{ }^\circ\text{C}$ graus-dia acumulados. Na safra de 2013/2014 o modelo de estimativa de produtividade ZAE obtido com os dados tabelados pela FAO preveu uma produtividade real final da cultura de cana-de-açúcar de $113,51 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

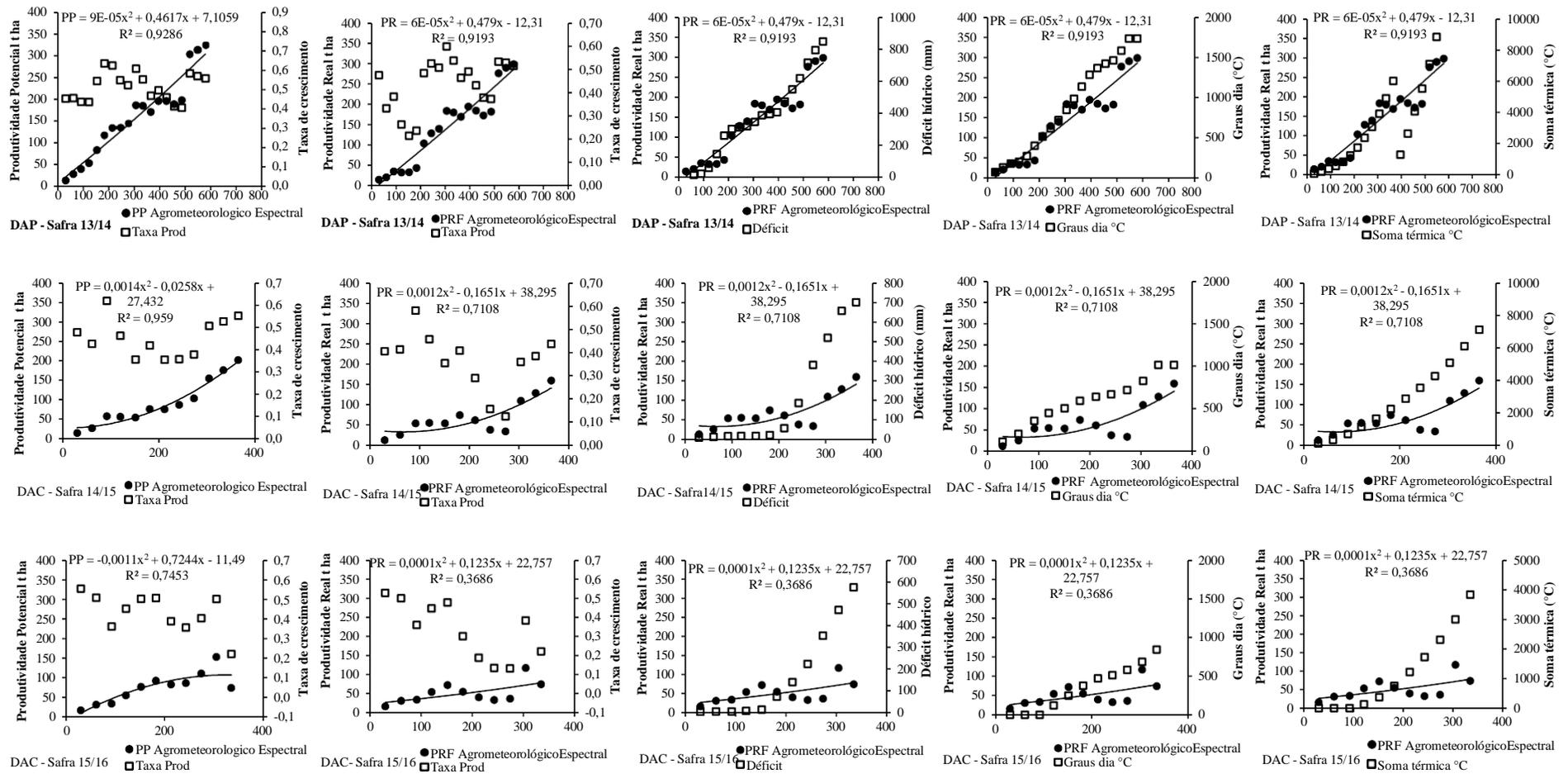


Figura 4.4 Produtividade potencial (PP), produtividade real (PR) estimada de cana-de-açúcar pelo método Agrometeorológico espectral para as safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 no município de Santo Antônio de Goiás-GO.

Na safra de 2014/2015 a produtividade real estimada pelo modelo Agrometeorológico Espectral no estágio de brotação e perfilhamento apresentou uma quebra de 7%, causado pelo déficit hídrico de 58,36 mm, a taxa de crescimento neste estágio foi de 0,41 t ha⁻¹ dia⁻¹. No estágio de crescimento a quebra na produtividade foi de 38,1% ocasionada pela deficiência hídrica de 355,95 mm, a taxa de crescimento foi de 0,34 t ha⁻¹ dia⁻¹. No estágio de maturação a quebra registrada foi de 25%, ocorrida devido um déficit hídrico de 179,57 mm, a taxa de crescimento foi de 0,39 t ha⁻¹ dia⁻¹. A produtividade final registrada pelo modelo ZAE com os dados obtidos no canavial para a safra de 2015/2016 foi de 71,82 t ha⁻¹.

Na safra de 2015/2016 a produtividade real estimada pelo modelo Agrometeorológico Espectral no estágio de brotação e perfilhamento apresentou uma quebra de 3%, causado pelo déficit hídrico de 58,36 mm, a taxa de crescimento neste estágio foi de 0,51 t ha⁻¹ dia⁻¹. No estágio de crescimento a quebra na produtividade foi de 40% ocasionada pela deficiência hídrica de 355,95 mm, a taxa de crescimento foi de 0,29 t ha⁻¹ dia⁻¹. No estágio de maturação a quebra registrada foi de 25%, ocorrida devido um déficit hídrico de 179,57 mm, a taxa de crescimento foi de 0,27 t ha⁻¹ dia⁻¹. A produtividade final registrada pelo modelo ZAE com os dados obtidos no canavial para a safra de 2015/2016 foi de 50,61 t ha⁻¹.

Silva (2016) estimou a produtividade da cana-de-acúcar em Juazeiro – BA em solo classificado como Vertissolo, com a variedade SP 79-1011, em cultivo irrigado por gotejamento por meio dos modelos Agrometeorológico (ZAE) e Agrometeorológico Espectral apresentaram boas respostas da produtividade estimada de 83,19 e 82,13 t ha⁻¹ respectivamente, quando comparadas com a produtividade real da usina de 98 t ha⁻¹ no período de de avaliação da safra de 2004/2005.

Na Figura 4.5 são apresentadas as produtividades reais estimadas em ciclo de cana-planta e 1^a e 2^a cana-soca das safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 com o modelo proposto por Martins e Landell. Na safra de 2013/2014 em ciclo de cana-planta o modelo estimou uma produtividade real final de 195 t ha⁻¹ com uma taxa de crescimento de 0,65 t ha⁻¹, com 175 °C graus-dia acumulados e deficiência hídrica total de 849 mm.

Na safra de 2014/2015 a produtividade real média estimada pelo modelo durante o estágio de brotação e perfilhamento 25 t ha⁻¹ e uma taxa de crescimento neste estágio de 0,84 t ha⁻¹ dia⁻¹. No estágio de crescimento a produtividade foi de 114 t ha⁻¹ e taxa de

crescimento de $0,59 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. No estágio de maturação a produtividade média foi de 160 t ha^{-1} , a taxa de crescimento foi de $0,57 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

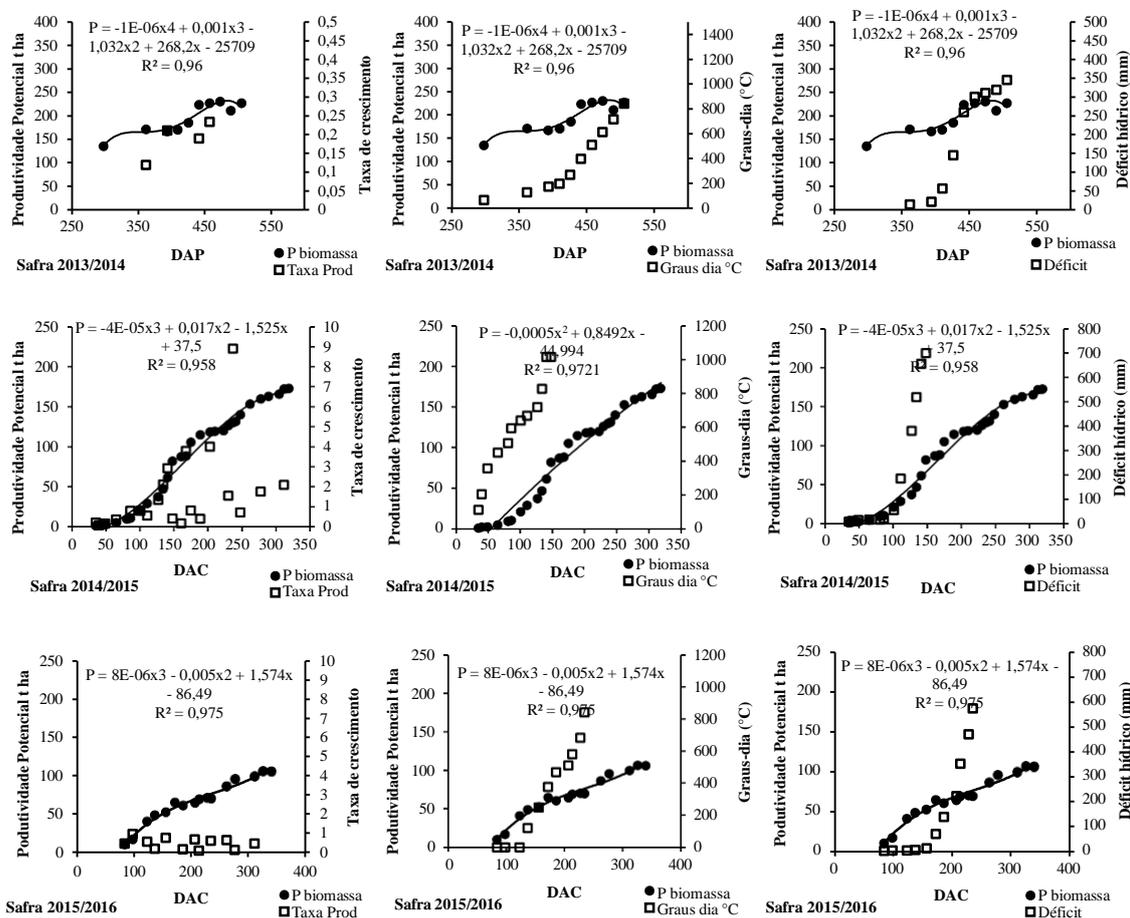


Figura 4.5 Produtividade potencial estimada de cana-de-açúcar pelo modelo proposto por Martins e Landell para as safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 no município de Santo Antônio de Goiás-GO.

Na safra de 2015/2016 a produtividade real média estimada pelo modelo durante o estágio de brotação e perfilhamento 33 t ha^{-1} e uma taxa de crescimento neste estágio de $0,54 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. No estágio de crescimento a produtividade foi de 66 t ha^{-1} e taxa de crescimento de $0,21 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. No estágio de maturação a produtividade média foi de 98 t ha^{-1} , a taxa de crescimento foi de $0,36 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

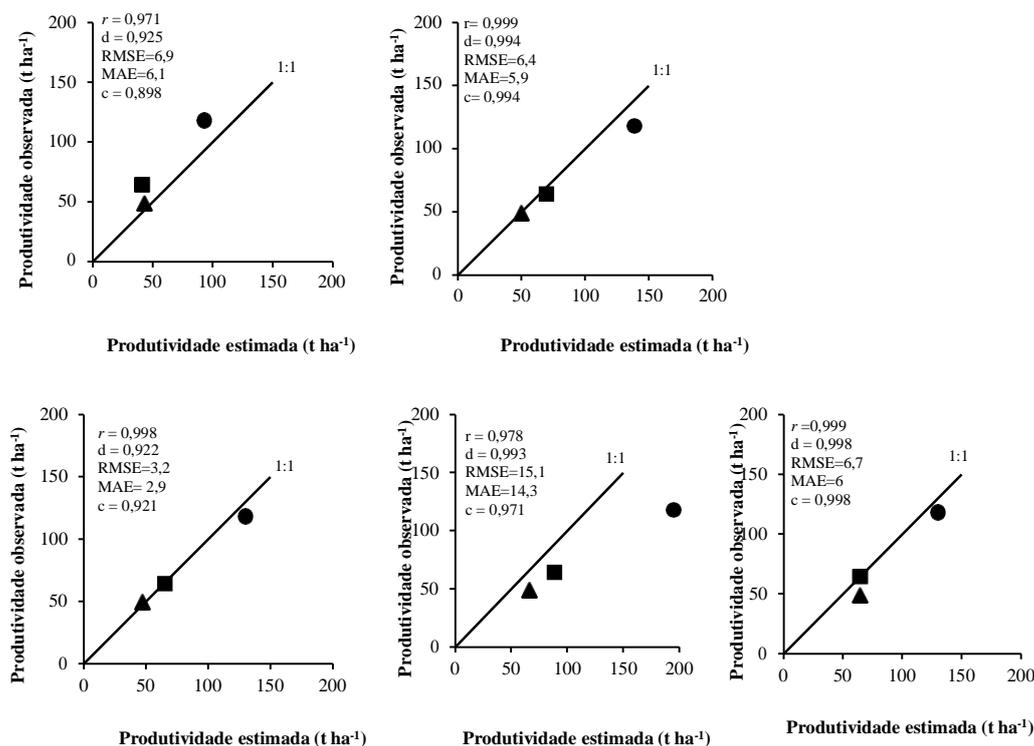


Figura 4.3 Relações da produtividade final estimada pelo modelo da Zona Agroecológica com os dados obtidos no canavial, Zona Agroecológica com os dados obtidos da FAO, Agrometeorológico Espectral, Martins e Landell e Scarpare e as produtividades observadas na usina CentroAlcool para as variedades CTC4 nos ciclos cana-planta (●), cana-1ª soca (■) e cana-2ª soca (▲).

A produtividade estimada pelo modelo proposto por Martins e Landell para o ciclo de cana-planta foi de 195 t ha^{-1} com taxa média de crescimento de $0,350 \text{ t ha d}^{-1}$. No ciclo de primeira cana-soca a produtividade foi de $88,7 \text{ t ha}^{-1}$ com taxa média de crescimento de $0,791 \text{ t ha d}^{-1}$. Na segunda soca a produtividade estimada foi de $66,4 \text{ t ha}^{-1}$ com taxa média de crescimento de $0,355 \text{ t ha d}^{-1}$.

O modelo proposto por Martins e Landell para estimativa de produtividade da cultura da cana-de-açúcar demonstrou uma tendência em superestimar a produtividade final comparada com a produtividade registrada na usina Centro álcool em 39%, 28% e 26% nas safras de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.

O modelo proposto por Scarpari (2002) apresentou estimativa de produtividade real para cana-de-açúcar em ciclo de cana-planta com 9% de superestimativa em relação a produtividade final da usina. Para ciclo de 1ª soca o modelo subestimou apenas 0,2%. Em cana de 2ª soca o modelo superestimou em 23% a produtividade final.

Corroborando com os resultados encontrados por Caetano & Casaroli (2017) que estimou a produtividade de cana-de-açúcar em ciclo de cana-planta e soca no município de Santo Antônio de Goiás – Go, para as safras de 2008/2009 a 2011/2012 da variedade CTC-04 com o modelo proposto por Scarpari (2002) onde apontou que o melhor ajuste para estimativa de produtividade foi no ciclo de cana-planta.

4.4 CONCLUSÃO

Na safra de 2013/14, 2014/15 e 2015/16 a evapotranspiração real acumulada final esteve em 36%, 55% e 63% respectivamente inferior quando comparada com evapotranspiração da cultura, a demanda hídrica atmosférica da região não supriu a necessidade hídrica da cultura de cana-de-açúcar. Os modelos de estimativa de produtividade ZAE, Padrão FAO e Agrometeorológico Espectral apresentou maior sensibilidade ao déficit hídrico nas safras de 2013/14, 2014/15 e 2015/16 durante o estágio de crescimento.

Dentre os modelos analisados para estimar a produtividade de cana-de-açúcar o Agrometeorológico Espectral apresentou capacidade superior em relação aos demais para estimar a produtividade da cana-de-açúcar. Além disso a sua implementação possui baixo custo e permite que ao longo do cultivo se monitore as condições médias climáticas por estágio fenológico, identificando as perdas potenciais na produtividade provocadas pela deficiência hídrica.

O modelo proposto por Scarpari apresentou melhor estimativa de produtividade de cana-de-açúcar em ciclo de cana-planta. O modelo proposto por Martins e Landell superestimou a produtividade real da cultura provavelmente por não contar com uma penalização da ocorrência de restrição climática.

4.3 REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, J. **Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estudio Riego e Drenaje Paper, 56).

ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J. M.; MENEZES, S. J. M. C. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando o Sebal e imagens Landsat. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Local, v. 29, n. 3 p. 433-442, 2014.

ATZBERGER, C. Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing**, 5, 949-981, 2013.

BENICASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 42 p.

CARVALHO, G. L. **eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006**. 2009. 120p. dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São, Piracicaba, 2009.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – ESALQ/USP. **PIB do Agronegócio Brasil**, março, 2017. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – Piracicaba, SP, 2017. 13 p.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, Agosto/2016 - Companhia Nacional de Abastecimento – Brasília: Conab 2016. 70 p.

COSTA, C. T. S. **Crescimento, produtividade e viabilidade econômica de cana-de-açúcar, sob diferentes lâminas de irrigação, na região de Penápolis- SP**. 102 f. 2012. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

CUADRA, S.V.; COSTA, M.H.; KUCHARIK, C.J.; DA ROCHA, H.R.; TATSCH, J.D.; INMAN-BAMBER, G.; DA ROCHA, R.P.; LEITE, C.C.; CABRAL, O.M.R. A biophysical model of sugarcane growth. **Global Change Biology Bioenergy**, v.4, p.36-48, 2012.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 172 p. Irrigation and Drainage Paper, 33.

FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M.; NETO, J. D. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.

FISCHER, G.; VELTHUIZEN, H. V.; SHAH, M.; NACHTERGAELE, F. O. Global agroecological assessment for agriculture in the 21st century: Methodology and results. Laxenburg: IIASA, 2002. 155 p.

GONZALEZ-SANPEDRO, M. C.; TOAN, T.; MORENO, J.; KERGOAT, L.; RUBIO, E. Seasonal variations of leaf area index of agricultural fields retrieved from Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, Local, . 112, n. 3, p. 810-824, 2008.

GOUVEA, J. R. F.; SENTELHAS, P. C.; GAZZOLA, S. T.; SANTOS, M. C. Climate changes and technological advances: Impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agricola**, Local, v. 66, p. 593-605, 2009.

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

LAPOLA, D. M.; PRIESS, J. A.; BONDEAU, A. Modeling the land requirements and potential productivity of sugarcane and jatropha in Brazil and India using the LPJmL dynamic global vegetation model. **Biomass & Bioenergy**, v. 33, p. 1087-1095, 2009.

MACIEL, G. F.; AZEVEDO, P. V.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. Impactos do aquecimento global no zoneamento de risco climático da soja no estado do Tocantins. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 6, n. 3, p. 141-154, set /dez 2009.

MARIN, F.R.; LOPES-ASSAD, M.L.; ASSAD, E.D.; VIAN, C.E.; SANTOS, M.C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 1449-1455, 2008.

MELO, R. W.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; DUCATI, J. R. Na agrometeorological-spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n.2, p. 4013-4028, 2008.

NIEUWENHUIS, G. J. A.; WIT, A. J. W.; VAN KRAALINGEN, D. W. G.; VAN DIEPEN, C. A.; BOOGAARD, H. L. Monitoring crop growth conditions using the global water satisfaction index and remote sensing. **ISPRS**, p. 684-687, 2012.

> Acesso em 27 de dezembro de 2012.

REIS, G. G.; MULLER, M. W. **Análise de crescimento de plantas e mensuração do crescimento**. Belém: CPATU, 1979. 35 p.

REMBOLD, F.; ATZBERGER, C.; ROJAS, O.; SAVIN, I. Using low resolution satellite imagery for field prediction and yield anomaly detection. **Remote Sensing**, 5, 1704-1733, 2013.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônômico para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 73-80, 2007.

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

SILVA, V. J.; CARVALHO, H. P.; SILVA, C. R.; CAMARGO, R.; TEODORO, R. E. F. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia-MG. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 95-101, 2011.

TUBIELLO, F. N.; FISCHER, G. Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000-2080. **Technological Forecasting e Social Change**, Local, v. 74, n.2 , p. 1030-1056, 2007.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Publications in Climatology, New Jersey, Drexel Inst. of Technology, 1955.104 p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS (2013) – *Landsat 8*. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>>, Acesso em 19 setembro de 2016.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, Oxford, v. 11, n.1, p. 41-76, 1947.