



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

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DA CANA-DE-
AÇÚCAR ESTIMADA PELO ALGORITMO SAFER**

RODOLFO FERNANDES MUSSI

Orientador:

Prof. José Alves Júnior

Goiânia - GO

Brasil

Março - 2017

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS 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 nº 9610/98, 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.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Nome completo do autor: Rodolfo Fernandes Mussi

Título do trabalho: Evapotranspiração máxima da cana-de-açúcar estimada pelo algoritmo SAFER

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

Rodolfo Fernandes Mussi

Data: 15 /03 / 2017

Assinatura do (a) autor (a)

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

RODOLFO FERNANDES MUSSI

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DA CANA-DE-
AÇÚCAR ESTIMADA PELO ALGORITMO SAFER**

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. José Alves Júnior

Co-orientador:

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 Bibliotecas da UFG.

Mussi, Rodolfo Fernandes

Evapotranspiração máxima da cana-de-açúcar estimada pelo algoritmo SAFER [manuscrito] / Rodolfo Fernandes Mussi. - 2017. 76 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Alves Júnior; co-orientador Adão Wagner Pego Evangelista.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia, 2017.

Bibliografia. Anexos.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

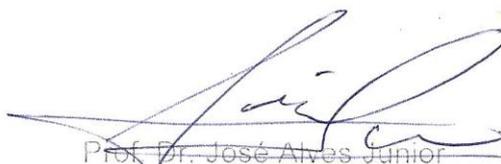
- 1. *Saccharum officinarum* L. 2. sensoriamento remoto. 3. SAFER. 4. necessidade hídrica. 5. cerrado. I. Alves Júnior, José, orient. II. Título.**

CDU 631/635

RODOLFO FERNANDES MUSSI

Evapotranspiração máxima da cana-de-açúcar estimada
pelo Algoritmo Safer

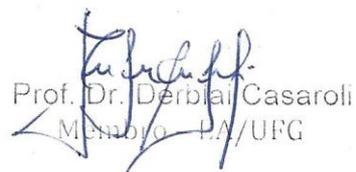
Dissertação DEFENDIDA em 15 de março de 2017, e APROVADA pela Banca
Examinadora constituída pelos membros:



Prof. Dr. José Alves Junior
Presidente da Banca - EA/UFG



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



Prof. Dr. Derblai Casaroli
Membro - EA/UFG



Prof. Dr. João Maurício Fernandes Souza
Membro - UniEvangelical/Anápolis



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos quinze dias do mês de março do ano de dois mil e dezessete (15.03.2017), às 13h30min, no Mini-auditório do PPGA, da Escola de Agronomia da UFV, reuniu-se a Banca Examinadora, composta pelos membros: Prof. Dr. José Alves Junior - Orientador e Presidente da Banca, Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista, Prof. Dr. Derblai Casaroli e Prof. Dr. João Maurício Fernandes Souza, para a realização da sessão pública da defesa de Dissertação intitulada: **“Evapotranspiração máxima da cana-de-açúcar estimada pelo Algoritmo Safer”**, de autoria de **Rodolfo Fernandes Mussi**, discente do curso de **Mestrado**, na área de concentração em **Solo e Água**, do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFV. A sessão foi aberta pelo presidente, que fez a apresentação formal dos membros da Banca e deu início as atividades relativas à defesa da Dissertação. Passou à palavra ao mestrando que em quarenta minutos apresentou o seu trabalho. Após a exposição, o candidato foi arguido sequencialmente pelos membros da banca. Terminada a fase de arguição, procedeu-se à avaliação da defesa. De acordo com Resolução CEPEC 1403/2016, de 10 de junho de 2016 que regulamenta os Programas de Pós-Graduação *Stricto Sensu* na UFV, a Banca Examinadora considerou a Dissertação **“APROVADA”**, com as correções recomendadas, estando integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE** em Agronomia, na área de concentração em **SOLO E ÁGUA**, pela Universidade Federal de Goiás. O mestrando poderá efetuar as modificações sugeridas pela Banca Examinadora e encaminhar nova versão eletrônica da Dissertação à Secretaria do PPGA, no prazo máximo de trinta dias após a data da Defesa. A Banca Examinadora recomendou a publicação de artigo(s) científico(s), oriundo(s) dessa Dissertação, em periódicos de circulação nacional e, ou, internacional, depois de acatadas as modificações sugeridas. Para finalizar, o Presidente agradeceu os membros examinadores, congratulou-se com o mestrando e encerrou a sessão às 17h05min, para constar. eu Welinton Barbosa Mota, secretário do PPGA, lavrei a presente Ata que depois de lida e aprovada, será assinada pelos membros da Banca Examinadora, em quatro vias de igual teor.


Prof. Dr. José Alves Junior
Presidente da Banca - EA/UFV


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


Prof. Dr. Derblai Casaroli
Membro - EA/UFV


Prof. Dr. João Maurício Fernandes Souza
Membro - UniEvangelica/Anápolis

“A inteligência é o farol que nos guia, mas é a vontade que nos faz caminhar.”

(Érico Veríssimo)

AGRADECIMENTOS

Não foi fácil, ao mesmo tempo em que o relógio parecia correr mais rápido que o normal, essa caminhada relativamente breve parecia não ter fim em alguns momentos. Dificuldades constantes. Distância da família. Perdas, e um ambiente novo para se viver. Todos esses fatores fizeram com que eu ficasse cada vez mais fortalecido para vencer cada obstáculo. A frase “Para todo esforço uma recompensa” nunca me pareceu tão verdadeira. Agora, quase ao fim dessa árdua jornada, dedico este manuscrito as pessoas que participaram de forma direta e indireta.

Aos meus amados pais, Robson e Márcia, que desde sempre me deram total apoio sentimental. Ensinaram-me a importância da família e me mostraram que o estudo é a forma mais fácil, de se tornar uma grande pessoa e atingir seus objetivos.

A meu irmão, Rafael, pela amizade e o compartilhamento de seu intelecto durante esses anos. Aos meus familiares que sempre entenderam todo o meu esforço e demonstraram grande apoio. Aos meus amigos, pela compreensão e pela companhia durante este ciclo que chega ao fim.

Aos professores que compõe o Núcleo de Pesquisas em Clima e Recursos Hídricos do Cerrado (NUCLIRH), por transmitirem o vasto conhecimento técnico e prático, sendo o meu espelho em vários momentos.

Aos alunos de graduação e pós-graduação que integram o NUCLIRH, por auxiliarem nos trabalhos desenvolvidos, inclusive na interpretação de alguns resultados.

Em especial ao grande Professor Dr. José Alves Júnior, que me acolheu tão bem em um momento que me encontrava “desamparado” e com seu vasto conhecimento me proporcionou tornar-me uma pessoa mais sábia e correta. Sou grato por tudo, inclusive as cobranças.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), por todo apoio e estrutura fornecida durante o mestrado.

Ao CAPES pelo fomento da bolsa de estudos durante toda a pós-graduação.

A empresa Jalles Machado, por ceder suas instalações, estrutura e apoio incondicional para a realização desta pesquisa.

Meus sinceros agradecimentos!

A meu pai, Robson Genaro Mussi,

A minha mãe, Márcia Helena Fernandes Mussi,

A meu irmão, Rafael Fernandes Mussi.

DEDICO

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE FIGURAS	12
RESUMO	14
ABSTRACT	15
1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 CANA-DE-AÇÚCAR	19
2.1.1 A cultura da cana-de-açúcar	19
2.1.2 Importância econômica no Brasil	20
2.1.3 Cana-de-açúcar na região do cerrado e Vale do São Patrício em Goiás	21
2.1.4 Variedade IAC 91 -1099	22
2.1.5 Estresse por deficiência hídrica	23
2.1.6 Temperatura foliar	23
2.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	24
2.3 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO NA AGRICULTURA	25
2.4 SAFER.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 LOCAL, CLIMA E SOLO	27
3.2 ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	29
3.2.1 Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância	30
3.2.2 Cálculo de reflectância	31
3.2.3 Albedo no topo da atmosfera	32
3.2.4 Albedo de superfície	33
3.2.5 Temperatura de superfície	33
3.2.6 Índice de vegetação de diferença normalizada NDVI	34
3.2.7 Evapotranspiração utilizando o algoritmo SAFER	35
3.3 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	36
3.4 CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO	38
3.4.1 Calibração do sensor EC-5	39
3.4.2 Balanço hídrico utilizando sensores de umidade	40
3.5 TEMPERATURA FOLIAR	42

3.6	AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS	44
3.6.1	Altura de planta e diâmetro de colmos	44
3.6.2	Números de perfilhos por metro linear	45
3.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA	45
4	RESULTADOS E DICUSSÕES	47
4.1	DESENVOLVIMENTO E PRODUÇÃO DAS PLANTAS SEM RESTRIÇÃO HÍDRICA.....	47
4.2	EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR	53
4	CONCLUSÕES.....	65
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
ANEXOS	71

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Caracterização química e física do solo em Goianésia - GO 2016.....
- Tabela 2.** Características de cada componente de banda termal do satélite Landsat 8.....
- Tabela 3.** Relação entre as diferentes rotações e as tensões fornecidas pelo fabricante da centrífuga para obtenção da curva característica de retenção de água no solo.....
- Tabela 4.** Parâmetros de ajuste da curva característica de retenção de água no solo pelo modelo de Van Genuchten (1980), a partir do potencial matricial em kPa e do conteúdo de água em $m^3 m^{-3}$
- Tabela 5.** Indicadores de qualidade para a cultura da cana-de-açúcar e valores obtidos para a variedade IAC 91 10-99 na safra de 2015/2016 em uma área de irrigação plena por pivô central de 100 ha em Goianésia, GO.....
- Tabela 6.** Período, em dias, para cada fase de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar (IAC 91-1099), Goianésia, GO.....
- Tabela 7.** Evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar (IAC91-1099) nas datas e pontos amostrados nas imagens Landsat 8. Goianésia, GO, 2015-2016.....
- Tabela 8.** Componentes do balanço hídrico em cana-de-açúcar de 21 de outubro de 2015 a 3 de agosto de 2016 na camada de 0-0,55 m, Goianésia, GO.....

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Fases fenológicas da cana-de-açúcar; período de cultivo dos respectivos ciclos da cultura.....
- Figura 2.** Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar para o Estado de Goiás.....
- Figura 3.** A: Local de coleta de dados para pesquisa - coordenadas geográficas 15°15'57,75 S; 48°51'12,9 O, Goianésia, GO. B: Destaque para área (100 ha) cultivada com cana-de-açúcar (IAC91-1099, primeiro ciclo) irrigada por aspersão (pivô central) em 17/12/2015 (180 DAP), e C: Marcadores indicam o centro do pivô e os três pontos de instalação de sensores de monitoramento de umidade do solo e precipitação (chuva e irrigação).....
- Figura 4.** Vista do local do experimento, com destaque para a localização da estação meteorológica do INMET, 17 Km da área experimental de cana-de-açúcar irrigada por pivô central, Goianésia, GO, 2016.....
- Figura 5.** Estação meteorológica Automática do INMET localizada na Usina Jalles Machado, Goianésia, GO.....
- Figura 6.** A: Croqui de instalação do sensor ECH₂O, B: modelo EC-5, nas profundidades 0,15, 0,35, 0,55, e 0,75 m, a 0,3 m da linha de plantio de cana cultivada em Goianésia, GO, 2016. Destaque para o C: dataloger EM50, D: sensor de chuva ECRN 50, E: Vista do acoplamento dos sensores de solo e pluviômetro no datalogger
- Figura 7.** Termômetro digital laser de infravermelho (marca: Fluke, modelo 59 max+) utilizado para medir temperatura foliar da cana-de-açúcar, Goianésia, GO, 2016.....
- Figura 8.** Sistema de numeração de folhas, Kuijper (1915).....
- Figura 9.** Vista da medição de altura da cultura da cana-de-açúcar, Goianésia, GO, 2016.....
- Figura 10.** Conteúdo de água no solo no ponto de capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PM) e no ponto crítico de armazenamento de água (limite de segurança), monitorado na camada de 0,2 m do solo; Irrigações e precipitações pluviométricas registradas ao longo do ciclo da cultura.....

- Figura 11.** Dados de temperatura (°C) foliar e do ar (°C), ao longo do ciclo de cana-de-açúcar (IAC 91 - 1099) em 1º. ciclo (irrigação plena), em Goianésia, GO (2015/2016).....
- Figura 12.** Temperatura média do ar e radiação solar global durante o ciclo da cultura da cana de açúcar (398 dias), Goianésia, GO (10/06/2015 a 12/07/2016).....
- Figura 13.** Dados de altura de planta e diâmetro de colmo ao longo do ciclo na cultura da cana-de-açúcar entre os períodos de outubro de 2015 e julho de 2016.....
- Figura 14.** Evapotranspiração da cultura (FAO 56) em função dos dias após o plantio na cultura da cana-de-açúcar em Goianésia,GO.....
- Figura 15.** Mapas de Evapotranspiração atual pelo modelo SAFER referente ao período de junho de 2015 a julho de 2016, cultura de cana-de-açúcar irrigada por pivô central, Goianésia, GO.....
- Figura 16.** Comparativo da ET_c estimada pelo método padrão FAO-56 (Allen et al., 1998), com evapotranspiração estimada atual (ET_a) utilizando o SAFER.....
- Figura 17.** Dispersão de dados entre ET_c estimado pela FAO 56 e ET_a estimado pelo SAFER (A: de 0 a 250 dias; B: de 250 até o fim do ciclo)
- Figura 18.** A e B: Comparativo entre ET_C FAO 56 e ETBHS ao longo do ciclo da cultura da cana-de-açúcar; C: Evapotranspiração real da cana-de-açúcar (IAC 91 – 1099) estimada pelo SAFER (ET_{SAFER}), balanço hídrico ETBHS e ET_C FAO 56, Goianésia, GO, 2015/2016 e D: Comparativo da evapotranspiração pelo balanço hídrico do solo (ETBHS), e a ET_c SAFER, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar.....
- Figura 19.** Gráfico de dispersão de dados de coeficiente de cultura obtidos pelo SAFER e pela FAO 56
- Figura 20.** NDVI obtido pelo algoritmo SAFER em função dos dias após o plantio da cultura da cana-de-açúcar.....

RESUMO

MUSSI, R. F. **Evapotranspiração máxima da cana de açúcar estimada pelo Algoritmo SAFER**, 2017. 77 f. (Mestrado em Agronomia: Solo e Água) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017¹.

A cana-de-açúcar é a principal cultura irrigada no Brasil (mais de 25% de toda área irrigada no país), necessitando de uma precipitação acumulada durante seu ciclo de 1.000 mm ano⁻¹. Assim, a evapotranspiração é uma informação fundamental para se realizar o planejamento, o projeto hidráulico, o manejo da água ao longo do ciclo e a gestão dos recursos hídricos para cultura. O planejamento de irrigação baseado em valores empíricos do coeficiente de cultivo (Kc) pode aumentar os custos de produção, reduzir a qualidade do produto e o rendimento. O uso do sensoriamento remoto associado com imagens orbitais e algoritmos, auxiliam na estimativa da evapotranspiração quando aliado a modelos físicos. O SAFER é um algoritmo simplificado quando comparado com os outros que também são utilizados para determinar evapotranspiração atual da cultura, pois ele é baseado na equação de Penman-Monteith para obter a evapotranspiração, sendo esse fator o principal para a escolha deste algoritmo para sua utilização. Dessa maneira, o objetivo deste estudo foi determinar a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar (primeiro ciclo), bem como os respectivos coeficientes de cultura (Kc) para a região do Vale do São Patrício em Goiás, por balanço de energia (utilizando o sensoriamento remoto aliado ao algoritmo SAFER) e por balanço hídrico (monitorando a atmosfera e a água no solo). Assim, este estudo teve o objetivo de estimar a evapotranspiração atual da cultura (ETa) da variedade IAC 91-1099 de cana-de-açúcar pelo modelo de balanço de energia SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) utilizando imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS, e comparação com método de balanço de água no solo utilizando sensores de umidade do solo (EC-5) e evapotranspiração de referência (ETo Penman-Monteith). O estudo foi realizado na Fazenda Esplanada, no município de Goianésia/Go, no período de Junho/2015 a Julho/2016, em solo de textura média com preparo convencional e transplântio de mudas em are irrigada por pivô central de 100 ha (manejo de irrigação plena). Além disso, foi monitorado altura de planta, diâmetro de colmo, temperatura foliar, produtividade e qualidade de caldo. O status hídrico do solo e da planta revelaram que não ocorreu déficit hídrico ao longo do ciclo de 398 dias. Os resultados mostraram ainda, que para estimativa da evapotranspiração de cana-de-açúcar o método SAFER superestimou o ETBHS em 22,89 %. E apesar da ETa estimada pelo método do SAFER apresentar significativa correlação com o método de balanço hídrico ($R^2 = 0,7784$), outros estudos precisam ser conduzidos antes de ser recomendado para estimativa da ETa da cana-de-açúcar na região.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum* L., sensoriamento remoto, SAFER, necessidade hídrica, cerrado.

¹ Orientador: Prof. Dr. José Alves Júnior, EA/UFG.

Co-Orientador: Prof. Dr. Adão Wagner Pego Evangelista, EA/UFG.

ABSTRACT

MUSSI, R. F. **Potential evapotranspiration of sugarcane crop estimated by SAFER algorithm**, 2017. 78 f. (Mater in Agronomy: Soil and Water) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017¹.

Sugarcane is the main irrigated crop in Brazil (more than 25% of all irrigated areas in the country), requiring cumulative rainfall during its 1,000 mm year⁻¹ cycle. Thus, evapotranspiration is a fundamental information for planning, hydro-hydraulic design, water management along the cycle and management of water resources for culture. Irrigation planning based on empirical values of the crop coefficient (Kc) can increase production costs, reduce product quality and yield. The use of remote sensing associated with orbital images and algorithms, aid in the estimation of evapotranspiration when combined with physical models. The SAFER is a simplified algorithm when compared to the others that are also used to determine the current evapotranspiration of the crop, since it is based on the Penman-Monteith equation to obtain the evapotranspiration, being this factor the main one to choose this algorithm for its use. In this way, the objective of this study was to determine the evapotranspiration of the sugarcane crop (first cycle), as well as the respective crop coefficients (Kc) for the region of the São Patrício Valley in Goiás, by energy balance (Using the remote sensing allied to the SAFER algorithm) and water balance (monitoring the atmosphere and water in the soil). Thus, this study had the objective of estimating crop evapotranspiration (ETa) of the variety IAC 91-1099 of sugarcane by the SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) energy balance model using images from Landsat 8 OLI / TIRS, and comparison with soil water balance method (ETBHS) using soil moisture sensors (EC-5) and reference evapotranspiration (ETo Penman-Monteith). The study was carried out at Esplanada Farm, in Goianésia / Goiás, from June / 2015 to July / 2016, in medium texture soil with conventional tillage and transplanting of seedlings in irrigated areas of 100 ha (central pivot). In addition, plant height, stem diameter, leaf temperature, yield and juice quality were monitored. The water status of the soil and the plant revealed that there was no water deficit during the cycle of 398 days. The results also showed that for the estimation of sugarcane evapotranspiration the SAFER method overestimated the ETBHS in 22.89%. Despite of the ETa estimated by the SAFER method to present a significant correlation with the water balance method (R² = 0.7778), other studies must be conducted before being recommended for estimation of sugarcane ETa in the region.

Key words: *Saccharum officinarum* L., remote sensing, Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving, water requirement, Brazilian savanna.

¹ Adviser: Prof. Dr. José Alves Júnior, EA/UFG.

Co-adviser: Prof. Dr. Adão Wagner Pego Evangelista, EA/UFG.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo o setor sucroenergético um dos 3 mais importantes para o agronegócio brasileiro. A cana-de-açúcar é a principal matéria prima para a produção do açúcar e do etanol, e recentemente também tem sido utilizada para produção de energia elétrica. O país é responsável por mais da metade do açúcar comercializado no mundo, e as estimativas indicam uma taxa média anual de crescimento de 3,5% no período 2015/2016 a 2025/2026 (MAPA, 2016). O etanol, produzido no Brasil, a partir da cana-de-açúcar, também conta com projeções positivas para os próximos anos, devido principalmente, ao crescimento do consumo interno. A produção projetada para 2019 é o dobro da registrada em 2008 (CONAB, 2016).

Entretanto, o relatório da OECD-FAO (2015) afirma que alguns fatores podem dificultar essas projeções, com destaque para condições climáticas adversas que podem reduzir as produtividades médias. Um desses fatores é o acentuado déficit hídrico que ocorre em novos ambientes incorporados para cultivo de cana-de-açúcar desde 2003. E muitas destas regiões de expansão estão em Goiás (CANAPLAN, 2015). Assim, o desenvolvimento de pesquisas que auxiliem seu cultivo irrigado será um fator determinante para o aumento da produção e ampliação de novas áreas de cultivo.

Goiás é o segundo maior produtor nacional, e vem ao longo dos anos se destacando com a cana-de-açúcar, com aumento da área plantada, produção e produtividade. Entre os fatores que favoreceram o incremento dos números em Goiás estão o clima tropical adequado para a produção, necessitando de duas estações distintas, a estação quente e úmida que favorece a germinação, perfilhamento e desenvolvimento vegetativo, e a outra estação, a fria e seca, que favorece a maturação e elevação da sacarose na planta. Goiás é favorecido ainda pelo fotoperíodo adequado à cana-de-açúcar, ou seja, a planta recebe as horas de iluminação necessárias para ter bom desenvolvimento vegetativo. O relevo auxilia na mecanização da lavoura e com isso, redução nos custos de produção e impacto ambiental. Entretanto, a produtividade tem sido, frequentemente, prejudicada pela irregularidade das chuvas. A média de produtividade dos últimos 10 anos não passa de 75 t/ha, acima da média nacional (70 t/ha), porém, abaixo de importantes regiões paulistas (>90 t/ha). Em anos com

baixos níveis pluviométricos, algumas regiões goianas não chegam a 60 t/ha (CONAB, 2011), como é o caso da região de Goianésia no Vale do São Patrício.

Assim, alguns estudos (Dantas Neto et al., 2006; Campos et al., 2014, Araújo et al., 2015) revelam que a irrigação associada ao seu manejo correto auxiliam no aumento de produtividade e qualidade da produção. A cana-de-açúcar é a principal cultura irrigada no Brasil (mais de 25% de toda área irrigada no país), necessitando de uma precipitação acumulada durante seu ciclo de 1.000 mm ano⁻¹. (Doorenbos & Kassam, 1994). Assim, a evapotranspiração é uma informação fundamental para se realizar o planejamento, o projeto hidráulico, o manejo da água ao longo do ciclo e a gestão dos recursos hídricos para cultura (Dantas Neto et al., 2005).

O planejamento de irrigação baseado em valores empíricos do coeficiente de cultivo (Kc) pode aumentar os custos de produção, reduzir a qualidade do produto e o rendimento. Neste sentido, muitos estudos têm sido conduzidos para se obter Kc mais apropriados de acordo com as condições locais, utilizando diferentes técnicas, tais como lisímetro (Alves Jr., et al., 2007; Barbosa Jr., 2007), método do balanço de energia (Silva et al., 2007; Sales et al., 2016, Souza, 2016) e o método do balanço hídrico (Cruz et al., 2005; Souza, 2016).

Outro método é o uso do sensoriamento remoto associado com imagens orbitais (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2007; Gowda et al., 2008; Kalman et al., 2008;). Algoritmos utilizados em imagens orbitais auxiliam na estimativa da evapotranspiração quando aliado a modelos físicos (Andrade et al., 2014; Lopes, 2014). Dentre esses algoritmos destaca-se o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen et al., 1998), o SEBS - Surface Energy Balance System (Su, 2002), METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) (Allen et al., 2007) e SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) (Teixeira et al., 2013).

O SAFER é um algoritmo simplificado quando comparado com os outros que também são utilizados para determinar evapotranspiração atual da cultura, pois ele é baseado na equação de Penman-Monteith para obter a evapotranspiração, sendo esse fator o principal para a escolha deste algoritmo para sua utilização. Tem como grande vantagem a utilização de dados meteorológicos provenientes de vários tipos de estações meteorológicas e o uso não obrigatório de bandas termais (Teixeira et al., 2013).

Dessa maneira, o objetivo deste estudo foi determinar a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar (primeiro ciclo), bem como os respectivos coeficientes de cultura (Kc) para a região do Vale do São Patrício em Goiás, por balanço de energia (utilizando o

sensoriamento remoto aliado ao algoritmo SAFER) e por balanço hídrico (monitorando a atmosfera e a água no solo).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CANA-DE-AÇÚCAR

2.1.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar *Saccharum* spp., é uma planta de ciclo semiperene originária do sudeste asiático, mais precisamente na região de Nova Guiné e Indonésia, em que a planta era cultivada de forma artesanal (Daniels & Roach, 1987). A civilização Persa foi a primeira a utilizar a cana-de-açúcar como matéria prima para a fabricação de açúcar cristalizado na forma sólida (Delgado & César, 1977).

A cultura apresenta metabolismo C4, sendo a sua capacidade de assimilação hídrica superior à de outras gramíneas de forma que a planta absorva pelas folhas o orvalho e os chuviscos que ficam retidos em sua parte aérea (Segato et al., 2006). Possui perfilhos em sua base e pode atingir mais de 2 metros de comprimento e 0,05 metros de diâmetro, sua parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescência e frutos e sua parte subterrânea formada por raízes e rizomas, que dá origem as gemas que por sua vez é responsável por formar os perfilhos (Segato et al., 2006). A cultura apresenta dois ciclos, sendo determinado pelo período de plantio da cultura, sendo de 12 meses (precoce) e 18 meses (tardia), sendo denominado cana-planta no seu primeiro corte e cana-soca para os posteriores cortes (Figura 1).

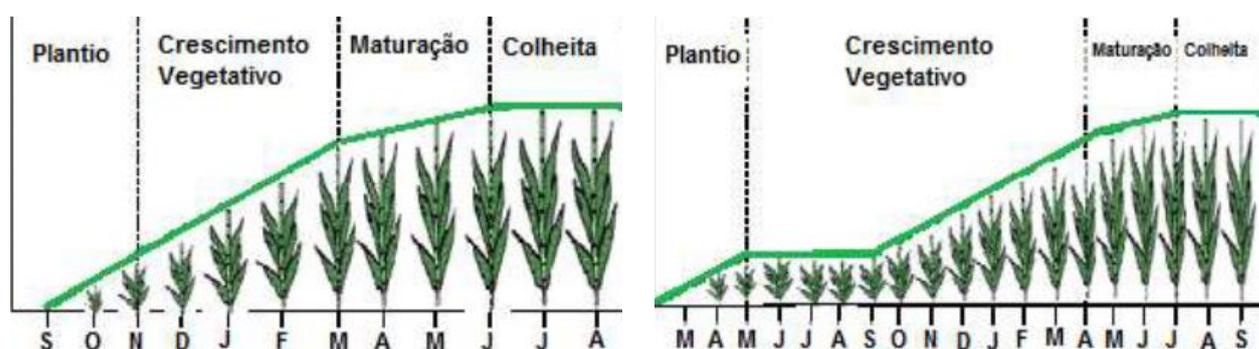


Figura 1. Fases fenológicas da cana-de-açúcar; período de cultivo dos respectivos ciclos da cultura (precoce, 12 meses e tardio, 18 meses).

Com o passar do tempo e o avanço das civilizações, houve uma disseminação da cultura a partir do século VIII, pelo mar Mediterrâneo através da conquista do Árabes no Ocidente (Mozambani et al., 2006). Após essa disseminação, os portugueses e espanhóis introduziram a cultura no continente Africano e na América do Sul, sendo no Brasil onde a cultura se desenvolveu de forma satisfatória devido as condições favoráveis encontradas no país e com a instalação de engenhos (Landell et al., 2006; Mozambani et al., 2006).

A cultura da cana-de-açúcar apresenta boa adaptabilidade, sendo cultivada principalmente em locais que se situam entre os paralelos de 35°N e 35°S, sendo que no Brasil, as variações climáticas possibilitam colheitas anuais de setembro a abril nas regiões Norte e Nordeste de maio a dezembro no Centro-Sul do país (Alfonsi et al., 1987). No Brasil, a cana-de-açúcar tem sido cultivada de forma voltada para a industrialização em todas as regiões, resultando em alta produção nacional e grande diversidade edafoclimática, responsável pela adaptação da cultura nas regiões de cultivo (Queiroz, 2006).

2.1.2 Importância econômica no Brasil

Com crescente preocupação de novas fontes de energias renováveis, a cultura da cana-de-açúcar foi impulsionada no Brasil e em outros países para a produção do etanol e do açúcar. O Brasil destaca-se dentro dos países que produzem a cultura da cana-de-açúcar, sendo o maior produtor, ficando à frente de países como Índia e China. O país saltou de 4,7% a 7,3% na participação mundial de produção da cultura (MAPA, 2011). O Brasil além de ser o maior produtor da cultura é o principal produtor e exportador de açúcar no mercado mundial, tendo a Rússia como o principal parceiro econômico (MAPA, 2012). O complexo sucroenergético que ocupava a terceira posição nas exportações agrícolas em 2004 alcançou a segunda posição em 2010. Isto representa um crescimento de 339% no período acumulado. O complexo soja, no mesmo período, alcançou um aumento de apenas 70,4%.

A moagem da cana-de-açúcar na região centro-sul deve atingir na safra 2016/2017 entre 605 e 630 milhões de toneladas. Nesse contexto espera-se um crescimento em torno de 2,28 a 3,78 milhões de toneladas em relação à safra anterior para a produção de açúcar, sendo que as unidades produtoras processaram nos primeiros 15 dias de abril 32,84

milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Este resultado é muito superior à moagem verificada em igual período do ciclo 2015/2016, a qual totalizou 13,05 milhões de toneladas. Essa quantidade processada é explicada pelo clima extremamente seco observado na primeira metade do mês - o que permitiu um excepcional aproveitamento de tempo pelas industriais, e pelo grande número de empresas em operação no período. A produção de etanol na safra 2016/2017, por sua vez, deve totalizar entre 27,50 e 28,70 bilhões de litros. Deste volume, entre 10,80 e 11,00 bilhões de litros serão de etanol anidro e entre 16,70 e 17,70 bilhões de litros de etanol hidratado (Única, 2017).

2.1.3 Cana-de-açúcar na região do cerrado e Vale do São Patrício em Goiás

O bioma Cerrado é o segundo maior da América do Sul, ocupando uma área de 2.036.448 km², cerca de 22% do território nacional brasileiro. Sua área abrange 10 estados nacionais mais o distrito federal (Sano et al., 2008). As principais atividades, agricultura e pecuária, representam o uso e a ocupação de cerca de 40% de toda a área.

Em Goiás, o Cerrado cobre 97% do território goiano (Sano et al., 2008). Levantamento realizado pela Embrapa Solos (2009) mostram quem 91% da área ocupada por agricultura e agropecuária são classificadas como média aptidão para a cultura da cana-de-açúcar. Esta classificação é baseada em dados climáticos e pedológicos (Manzatto, 2009). De acordo com o zoneamento agroecológico do estado de Goiás, os solos presentes são de aptidão preferencial e regular, conforme observa-se na Figura 2.

A expansão da cultura da cana-de-açúcar no estado de Goiás foi acelerada por diversos fatores que são favoráveis a cultura, como: terras com menor custo, topografia adequadas, infraestrutura e melhor logística e riqueza em recursos hídricos. Seu crescimento ocorreu basicamente de 2 formas distintas: A primeira em áreas historicamente já ocupadas por outras culturas e pela própria cultura da cana-de-açúcar, e a segunda por áreas oriundas da expansão agrícola que se deu por volta dos anos 80 (Silva & Miziara, 2011).

A aptidão da cultura, restringe-se a duas classes, sendo A e B. A classe A apresenta baixo risco à cultura e são adequadas ao seu cultivo devido a temperatura média anual ser superior a 19 °C e baixa probabilidade de geada, sendo inferior a 20 % sua incidência e a deficiência hídrica menor que 200 mm. A classe B, predominante no território goiano, é de baixo risco apresentando a mesma característica que o tipo A quando comparados a temperatura e a geada, já no quesito deficiência hídrica, a classe B apresenta

maior severidade ficando entre 200 a 400 mm, sendo necessário a irrigação suplementar, chamado de manejo de irrigação de salvamento ou déficit.

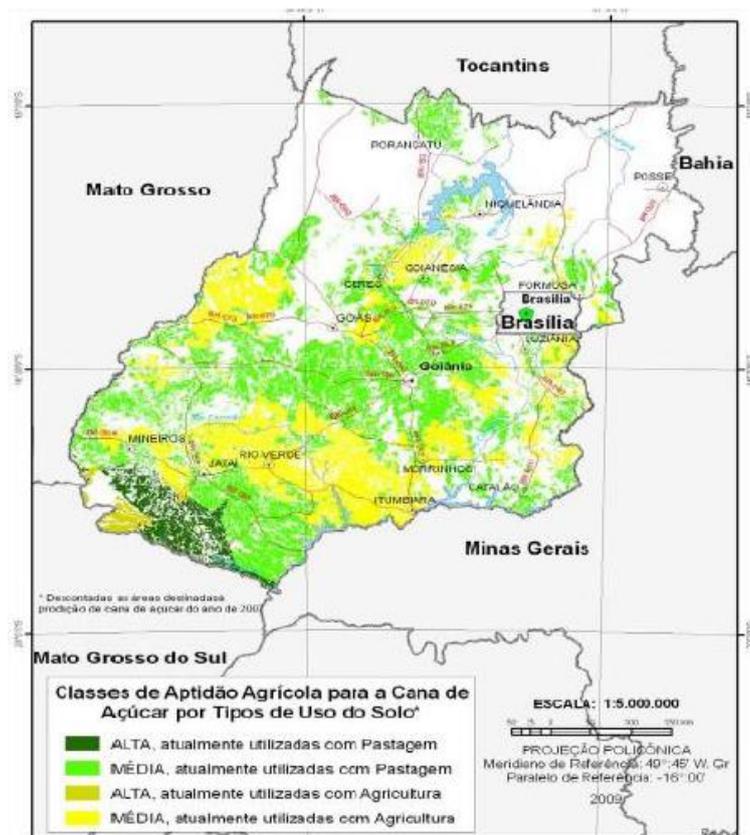


Figura 2. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar para o Estado de Goiás.

O Vale do São Patrício destaca-se por ser uma importante região produtora da cana-de-açúcar no estado de Goiás, destacando-se o município de Goianésia que possui a segunda maior área plantada com a cultura, ficando atrás apenas dos municípios de Quirinópolis e Turvelândia (Canasat, 2016). Essa região apresenta o déficit hídrico acentuado nos 5 primeiros meses do ano e apesar da precipitação média acumulada ser de aproximadamente $1.540 \text{ mm ano}^{-1}$ é um fator limitante para a produção da cultura da cana-de-açúcar o que resulta em baixa produtividade, em torno de $60,4 \text{ Mg ha}^{-1}$, aquém de importantes regiões paulistas, com 85 Mg ha^{-1} (Kohlhepp, 2010).

2.1.4 Variedade IAC 91 -1099

Segundo Maschio (2011), as variedades mais representativas em uso no Brasil são as chamadas “RBs”, seguidas das “SPs” e em menor escala “CTCs”, “IACs” e “POs”.

Dentro das variedades presentes da IAC destaca-se a IAC 91 – 1099, híbrido que possui habito de crescimento ereto e variedade bem adaptada à colheita mecânica, alta produtividade agrícola ao longo dos cortes, bom teor de sacarose, ótima brotação de soqueira, excelente fechamento das entrelinhas e perfilhamento, altura e diâmetro de colmos médio, e ciclo precoce-médio (Landell et al., 2007).

2.1.5 Estresse por deficiência hídrica

No meio agrícola, existem vários tipos de estresse ambientais relacionado a cultura, dentre esses, o estresse hídrico, que está relacionado tanto pela falta, quanto pelo excesso de água. O termo estresse hídrico está relacionado ao efeito negativo causado por uma influência externa da água sobre a planta (Angelocci, 2002; Taiz & Zeiger, 2009).

De acordo com Taiz & Zeiger (2009), deficiência hídrica é quando a quantidade de água que se encontra nos tecidos vegetais está abaixo do nível em que a planta está sobre correta hidratação. A deficiência hídrica pode causar danos nos processos fisiológicos e metabólicos, causando desta forma, redução na sua atividade e na produtividade (Pimentel, 2004; Taiz & Zeiger, 2009).

A cana-de-açúcar apresenta diferentes graus de deficiência hídrica de acordo com diferentes tipos de variedades e regiões de cultivo. Estas diferenças podem ser observadas no valor de potencial de água na planta. O estágio de desenvolvimento da cultura também interfere no grau de tolerância a deficiência hídrica, podendo ser mais sensível quando a planta está em pleno desenvolvimento, podendo afetar de forma direta a sua produtividade (Pimentel, 2004; Inmam-Bamber & Smith, 2005).

2.1.6 Temperatura foliar

A temperatura foliar é uma medida influenciada pela transpiração das plantas, fatores dos ambientes (radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar) e fatores biológicos que determinam a distribuição dos estômatos (Leuzinger et al., 2010). A temperatura foliar das plantas é determinada pelo efeito da transpiração, quando a planta transpira a água evaporada e exerce um efeito arrefecedor, fornecendo as folhas

temperatura menor do que a temperatura ambiente do ar (Idso et al., 1981). O equipamento de aferição da temperatura foliar é chamado de pistola de infra-red (Figura 2).

Segundo estudo realizado por Trentin et al. (2011) mostram que a transpiração e a temperatura foliar na cultura da cana-de-açúcar quando submetidas a diferentes potenciais matriciais do solo em ambiente protegido variam de acordo com a radiação solar, do déficit de pressão de vapor de água no ar e na variação do horário ao longo do dia. A cana-de-açúcar apresenta produção máxima quando a temperatura encontra-se entre 22°C e 30°C em sua fase vegetativa. Quando a temperatura apresenta valores abaixo de 20°C ocorre a redução do crescimento e quando a temperatura atinge 10°C ocorre a paralisação do crescimento. Quando a temperatura ultrapassa os 35°C o crescimento da cultura também é lento, sendo que, a temperatura ótima para o crescimento e desenvolvimento rápido da cultura é quando atinge a temperatura entre 30°C e 35°C (Segato, 2006).

2.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A transformação de uma substância do estado líquido para o estado de vapor por meio físico é chamada de evaporação. Este meio físico ocorre a todo instante ao redor do globo terrestre, sendo os mares, lagos, rios e solos os meios que mais influenciam na evaporação. Outro processo físico que possui características semelhantes ao processo de evaporação, em que os seres vivos perdem para atmosfera em forma de vapor a água contida em sua estrutura é chamada de transpiração. A evapotranspiração é o processo de perda de água para a atmosfera da superfície do solo, das plantas e da água livre (Pereira et al., 1997).

Quando a evapotranspiração de uma superfície for máxima, ou seja, não houver fatores que limitam o processo químico da evapotranspiração ela é chamada de evapotranspiração Potencial (ET_p). Desta forma o termo evapotranspiração potencial é sinónimo de necessidade hídrica, por requerer água sem que haja limitações.

Para o meio agrícola é importante conhecer a quantidade de água que as culturas perdem por meio desse processo físico denominado de evapotranspiração de referência. Este processo pode ser estimado utilizando de forma padrão uma cultura hipotética que se assemelha a taxa de evapotranspiração da grama sendo, altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m^{-1} (Allen et al., 1998).

De acordo com essas informações associado ao fator de correção denominado de Kc, coeficiente de cultura, se tem a demanda hídrica das culturas.

Outro processo de evapotranspiração é a real (ET_r) em que cada cobertura de solo ou cultura em qualquer estágio fenológico, podendo ou não estar com déficit hídrico ou outro fator que impeça a sua taxa potencial (Allen et al., 1998).

O balanço hídrico climatológico é uma forma de contabilizar a entrada e saída de água em um determinado sistema. Proposto por Thornthwaite & Mather (1955), este método é capaz de contabilizar o balanço de água no solo e identificar os períodos em que ocorre deficiência hídrica. O método contabiliza além da precipitação (P) a demanda atmosférica que é expressa pela evapotranspiração potencial (ETP) ou da cultura (ETC) a capacidade de água disponível ou armazenamento (CAD/ARM), excedente hídrico (EXC), déficit hídrico (DEF) e ainda pode fornecer estimativas da evapotranspiração atual da cultura (ET_a) (Pereira et al., 2002).

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO NA AGRICULTURA

A técnica de trabalhar um meio físico sem que haja contato direto é denominada de sensoriamento remoto. Imagens orbitais são geradas de forma digital por sensores que constituem um arranjo de elementos sobre a forma de malhas e grades digitais. A imagem orbital é bidimensional que representa a energia eletromagnética refletida ou emitida, sendo que a resolução espacial da imagem é dada pela relação entre o pixel e a área coberta por esta imagem.

O sensoriamento remoto integra bandas espectrais, sendo que cada banda espectral corresponde a uma faixa do espectro eletromagnético (Liu, 2007). A radiação solar quando incidida em um dossel, de qualquer que seja a cultura, pode ser absorvida, refletida e transmitida, dependendo do ângulo de incidência quanto as propriedades estruturais que cada cultura contém. Estas características são responsáveis por fornecer informações como o Índice de Área Foliar e outras propriedades da vegetação (Machado et al., 1982).

As plantas apresentam características que são influenciadas pela morfologia e estrutura de cada planta, isso interfere na variação da resposta espectral captada pelos sensores ao longo do espectro eletromagnético. No visível (0,4 a 0,7 μm) tem-se baixa refletância pelos pigmentos (clorofila “a” e “b” e carotenóides) absorverem a radiação solar

incidente nas folhas, já no infravermelho próximo (07, a 0,13 μm) apresenta uma maior reflexão (Gates et al., 1965). Quando se compara folhas maduras com folhas novas, observa-se uma diferença na questão da absorção da radiação, folhas maduras absorvem cerca de 5% mais na faixa do visível e refletem 15% no infravermelho próximo (Liu, 2007).

O uso do satélite no sensoriamento remoto é imprescindível, o satélite LANDSAT – 8 foi desenvolvido pela NASA e lançado no dia 11 de fevereiro de 2013, ele opera com dois instrumentos responsáveis pela obtenção das imagens, o primeiro é o Operational Land Imager (OLI), com nove bandas espectrais incluindo a pancromática, e o segundo, Thermal Infrared Sensor (TIRS). Ambos instrumentos a bordo do satélite fornecem uma cobertura sobre o globo terrestre a cada 16 dias. Outra vantagem do LANDSAT 8 é que diferente dos antecessores, ele apresenta uma tecnologia capaz de medir a radiação termal terrestre em duas bandas (Ren et al., 2014).

2.4 SAFER

O SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) é baseado na equação de Penman-Monteith para se obter a evapotranspiração atual. Possui simples aplicação, necessitando apenas de dados de evapotranspiração de referência (E_{To}), radiação global (r_g), temperatura média do ar (T) que são obtidos de diferentes tipos de estações agrometeorológicas que quando associados a dados obtidos por sensoriamento remoto e balanço de energia obtém-se o resultado da evapotranspiração atual da cultura (E_{Ta}), sendo considerado um algoritmo de simples utilização e estimativa (Teixeira, 2012a). A utilização da ferramenta SAFER auxilia na otimização do manejo de irrigação e determina coeficientes de cultura através da relação E_{Ta}/E_{To} (Feitosa, 2014).

O algoritmo vem sendo utilizado para estimar o balanço hídrico baseado na evapotranspiração real da cultura (E_{Ta}), no monitoramento de uso da água, estimativa da evapotranspiração e no planejamento do uso de recurso hídricos em geral. A seguir, apresenta-se as etapas do processo de obtenção da evapotranspiração atual da cultura (E_{Ta}) bem como os dados de diferentes coeficientes de cultura (K_c) ao longo do ciclo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL, CLIMA E SOLO

O experimento foi instalado (Figura 3) em Goianésia/GO (Vale do São Patrício), coordenadas 15° 15' S, longitude 48° 51' W e altitude de 640 m, em uma área irrigada, com cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) variedade IAC91-1099, no primeiro ciclo (cana planta) safra 2015/2016. O equipamento de irrigação utilizado foi um sistema de aspersão do tipo pivô central, irrigando uma área de aproximadamente 100 ha. O clima da região, pela classificação de Köppen, é do tipo Aw denominado tropical de savana, ou seja, clima com inverno seco e verão chuvoso. A região apresenta precipitação média igual 1540 mm por ano (ANA, 2012) com temperaturas médias anuais de 22 a 25 °C. Utilizou-se o aplicativo Irriger® para o manejo da irrigação, com o qual se determinou a demanda hídrica da cana-de-açúcar, utilizando-se coeficientes de ajuste (coeficiente da cultura “kc”, e do solo “ks”) sobre a evapotranspiração de referência (ET_o). Calculou-se a lâmina bruta de irrigação por meio de um balanço hídrico simplificado, considerando-se como entradas de água a irrigação e a precipitação pluvial efetiva e as saídas, a evapotranspiração da cultura (ET_c), além da profundidade considerada para o sistema radicular.

O solo foi classificado como LATASSOLO Vermelho Amarelo distroférico (Prado, 2007), e as características químicas e físicas do solo podem ser observadas na Tabela 1.

O aplicativo Irriger®, estima a evapotranspiração com base nos elementos meteorológicos disponíveis (radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar), por meio do modelo de Penman Monteith-FAO 56 (Allen et al., 1998). Os dados meteorológicos utilizados para a realização do experimento foram obtidos na estação meteorológica automática instalada 17 km da área experimental (Figuras 5 e 6).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental com cana-de-açúcar, em Goianésia, GO, 2016.

Camada (m)	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	K	P (mg kg ⁻¹)	M.O. (g kg ⁻¹)
		(cmolc dm ⁻³)						
0,00-0,25	5,5	2,24	1,16	0,0	1,9	0,195	6,5	15,1
0,25-0,50	5,6	1,36	0,26	0,0	1,6	0,318	0,7	8,9
Camada (m)	Argila		Silte		Areia		ds (kg m ⁻³)	
	(%)							
0,00-0,15	33		44		23		1440	
0,15-0,35	35		30		35		1260	
0,35-0,55	31		33		32		1530	
0,55-0,75	32		37		28		1200	

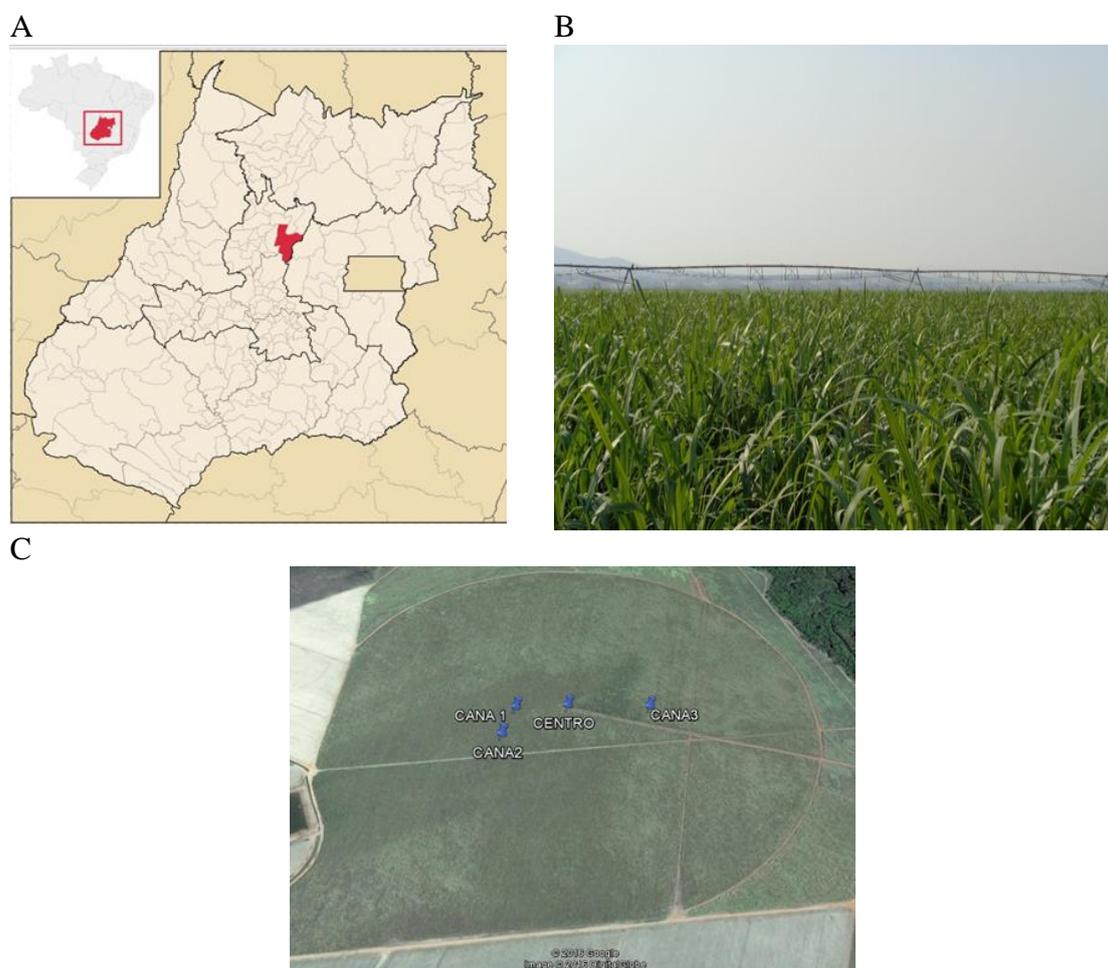


Figura 3. A: Local de coleta de dados para pesquisa - coordenadas geográficas 15°15'57,75 S; 48°51'12,9 O, Goianésia, GO. B: Destaque para área (100 ha) cultivada com cana-de-açúcar (IAC91-1099, primeiro ciclo) irrigada por aspersão (pivô central) e 17/12/2015 (180 DAP), e C: Marcadores indicam o centro do pivô e

os três pontos de instalação de sensores de monitoramento de umidade do solo e precipitação (chuva e irrigação).

3.2 ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A estimativa da evapotranspiração bem como os respectivos coeficientes de cultura (K_c) foram obtidos através de imagens do satélite LANDSAT 8, obtidas de forma gratuita no banco de imagens do United States Geological Survey – USGS (2015 - 2016). As imagens foram obtidas a partir de 14 dias após o plantio das mudas da cana-de-açúcar, no dia 24/06/2015, até o final do ciclo da cultura com um intervalo de 16 em 16 dias, sendo a frequência de passagem do satélite até atingir 398 dias após o transplântio das mudas.



Figura 4. Vista do local do experimento, com destaque para a localização da estação meteorológica do INMET, 17 Km da área experimental de cana-de-açúcar irrigada por pivô central, Goianésia, GO, 2016.

Após a obtenção das imagens orbitais bem como os seus respectivos tratamentos prévios, elas foram importadas para o software Arc Gis®10.2.2 e com auxílio do algoritmo SAFER determinado os valores médios das variáveis biofísicas que compõe a evapotranspiração atual e os respectivos coeficientes de cultura. Com a ferramenta de programação e cálculo utilizou-se a função *raster calculator* disponível no software gerenciador de Sistema de Informações Geográficas (SIG) que permite o cálculo e aplicação da modelagem através de dados *raster*.



Figura 5. Estação meteorológica automática do INMET localizada na Usina Jalles Machado, Goianésia, GO.

Dentro do SAFER, etapas são realizadas até a obtenção do produto final que é a evapotranspiração atual da cultura. A seguir são apresentadas as etapas envolvidas para a estimativa do balanço de energia e dos coeficientes de cultura. As etapas do processo seguem a metodologia proposta por Teixeira (2010) e Teixeira et al. (2012b; 2013).

3.2.1 Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância

DN representa um grid ou pixel que traz a intensidade de energia eletromagnética medida pelo sensor do satélite. Esses valores digitais são convertidos em radiância espectral para cada banda (Eq. 1). A radiância ($L\lambda$) é a intensidade radiante por unidade de área-fonte, projetada numa direção específica, sendo medida em watts por metro quadrado por esterradiano ($W m^{-2} sr^{-1}$).

$$L\lambda = \left(\frac{LMAX - LMIN}{255} \right) Q_{CAL} + LMIN \quad (1)$$

Em que:

LMAX: radiância máxima ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-2}$);

LMIN: radiância mínima ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-2}$);

Qcal: intensidade do pixel (ND), número inteiro de 0 a 255.

Tabela 2. Características de cada componente de banda termal do satélite Landsat 8.

Bandas	Comprimento de onda (μm^{-1})	Coefficientes de calibração - $\omega\lambda$ ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)	Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera - E_{SUN} ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)
Band 1 – Coastal aerosol	0,43 – 0,45	-	1895,60
Band 2 – Azul	0,45 – 0,51	0,301	2004,60
Band 3 – Verde	0,53 – 0,59	0,273	1820,70
Band 4 – Vermelho	0,64 – 0,67	0,233	1549,40
Band 5 – Infravermelho Próximo (NIR)	0,85 – 0,88	0,143	951,20
Band 6 – SWIR 1	1,57 – 1,65	0,037	247,60
Band 7 – SWIR 2	2,11 – 2,29	0,013	85,50
Band 8 – Pancromática (PAN)	0,50 – 0,68	-	724,00
Band 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	-	367,00
Band 10 – Infravermelho termal (TIRS) 1	10,60 – 11,19	-	-
Band 11 – Infravermelho termal (TIRS) 2	11,50 – 12,51	-	-

Fonte: Van Hellemont & Ruddick (2014)

3.2.2 Cálculo de reflectância

Para cada banda termal contidas nas imagens orbitais é calculada a reflectância ($p\lambda$) (Eq. 2) a partir dos valores encontrados de radiância no passo anterior, sendo a reflectância razão da quantidade de radiação refletida por um objeto pela quantidade de radiação que incide neste.

$$P_{\lambda} = \frac{\pi \times L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda} \times \cos Z \times E_0} \quad (2)$$

Sendo:

L_{λ} : radiância de cada banda;

SUN_{λ} : irradiância espectral no topo da atmosfera;

cosZ: ângulo zenital;

EO: ângulo diário;

Onde: EO é definido pela Equação 3:

$$E_0 = 1,000110 + 0,0342221 \cos(da) + 0,001280 (da) + 0,000719(2 x da) + 0,000077 \sin(2xda) \quad (3)$$

Sendo:

da: ângulo diário;

Onde: da é definido pela Equação 4:

$$da = (d_n - 1) \frac{2\pi}{365} \quad (4)$$

Em que:

d_n = dia Juliano da imagem

3.2.3 Albedo no topo da atmosfera

O albedo é uma medida adimensional e varia segundo as características da superfície, a razão entre a radiação solar direta e a difusa e em função do ângulo zenital solar. A obtenção do albedo no topo da atmosfera foi feita pela Equação 5:

$$\alpha_{top} = \Sigma(\omega_p x p_\lambda) \quad (5)$$

Onde:

ρ_λ : reflectância

ω_λ : coeficiente para cada banda

Sendo: $\omega\lambda$ obtido pela Equação 6.

$$\omega\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\Sigma ESUN_\lambda} \quad (6)$$

3.2.4 Albedo de superfície

O albedo da superfície é definido como a razão entre as irradiâncias refletida e incidente. As informações sobre o albedo de superfície e temperatura de superfície foram obtidas pelas Equações 2 e 3 utilizando-se os coeficientes de Texeira (2010):

$$\alpha_0 = 0,7 \times \alpha_{top} + 0,06 \quad (7)$$

Onde:

α_{top} : Albedo no topo da atmosfera, obtido pela Equação (5)

3.2.5 Temperatura de superfície

Os fundamentos do sensoriamento remoto termal estão embasados na termodinâmica clássica e na física quântica. A base fundamental do sensoriamento remoto do infravermelho termal é que toda superfície emite radiação, e sua intensidade depende da temperatura da superfície estudada.

Para elaborar a carta de temperatura da superfície, utiliza-se a imagem do canal do infravermelho termal do sensor OLI do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 60 metros.

A temperatura de superfície é calculada pela Equação 8:

$$T_0 = 1,11 \times T_{bright} - 31,89 \quad (8)$$

Onde: T_{bright} é obtido pela Equação 9:

$$T_{bright} = \frac{1260,56}{\ln\left(\frac{607,76}{L_{thermal} + 1}\right)} \quad (9)$$

Sendo:

L: radiância ($L\lambda$) da banda 10 e 11.

3.2.6 Índice de vegetação de diferença normalizada NDVI

O índice de vegetação da diferença normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do infra-vermelho próximo (IV P) e do vermelho (V) pela soma das mesmas (Allen et al., 2002). Em seguida são calculados os dados de NDVI pela Equação 10:

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (10)$$

Sendo:

IVP: valor da reflectância da banda no infravermelho próximo

V: valor de reflectância da banda no vermelho

O NDVI é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a + 1 e para a superfícies com alguma vegetação o NDVI varia de 0 e 1, já para a água e nuvens o NDVI é, geralmente, menor que zero.

3.2.7 Evapotranspiração utilizando o algoritmo SAFER

Posteriormente os dados de albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_0) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foram utilizados para se calcular os valores instantâneos da relação ET/ET_0 pela Equação 11:

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 * NDVI} \right) \right] \quad (11)$$

Para o coeficiente “a” foi utilizado o valor de 1,0 (Hernandez et al., 2012; Teixeira et al., 2013) determinado para o Noroeste Paulista, demonstrando ser bem adaptado às condições da região estudada. O coeficiente “b” foi obtido por Teixeira (2010) e corresponde ao valor de -0,008 e ET_0 é a evapotranspiração de referência (Equação 12), dada em milímetros por dia (mm d^{-1}), método Penman-Monteith, conforme boletim FAO 56 (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot (R_n - G) + \left[\frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{T + 273} \right]}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (12)$$

Em que: R_n é o saldo de radiação à superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), G é a densidade de fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), T é a média diária da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura (m s^{-1}), e_s é a pressão de vapor de saturação do ar (kPa), e_a é a pressão de vapor atual do ar (kPa), $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor de saturação do ar (kPa), Δ é a declividade da curva de pressão de vapor do ar na atmosfera ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Em seguida os valores instantâneos da relação (ET/ET_0) foram multiplicados pelos valores diários da ET_0 , chegando assim à evapotranspiração atual (ET_a), Equação 13:

$$ET_a = \frac{ET}{ET_0} \cdot ET_0 \quad (13)$$

A estimativa da evapotranspiração potencial da cultura é obtida pelo método da FAO Boletim 56 (Allen et al., 1998) através da Equação 14:

$$ET_C = ET_0 \cdot K_C \quad (14)$$

Em que: ET_C é a evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm/dia); K_C coeficiente de cultura (adimensional) – FAO 56 (Allen et al., 1998).

Em casos que a cultura não apresenta restrição hídrica, através da relação ET_a/ET_0 chega-se ao valor do coeficiente da cultura (K_C). Os K_C , pelo SAFER, foram calculados pela Equação 15:

$$K_C = \frac{ET_a}{ET_0} \quad (15)$$

Em que: ET_a é a evapotranspiração atual (mm d^{-1}); ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}).

3.3 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Para obtenção da curva de retenção de água no solo (Figura 19) utilizou-se a metodologia da centrífuga, no qual foi utilizado o equipamento de modelo kokusan H-1400 PF, em que cada rotação (rpm) do aparelho corresponde a uma tensão (kPa), conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Relação entre as diferentes rotações / tensões fornecidas pelo fabricante da centrífuga para obtenção da curva de retenção de água no solo.

ROTAÇÃO (rpm)	TENSÃO (kPa)	AJUSTE PARA (kPa)
0	0	0
600	6,55	6
700	8,91	8

800	11,64	10
1300	30,73	30
1800	58,91	60
2400	104,70	100
9100	1505,66	1500

O processo até a obtenção da curva de retenção de água no solo se deu início com a retirada de amostras indeformadas de solo utilizando anéis volumétricos de dimensões 0,05 x 0,05 m (diâmetro x altura) retirados com o auxílio de um amostrador, em cada profundidade (0,15; 0,35; 0,55 e 0,75 m) de instalação dos sensores de umidade do solo EC 5.

Após as amostras serem retiradas, envolveu-se papel filme para que não fosse perdido umidade, e principalmente solo, e levado para a geladeira para manter suas características. Em seguida, foram levadas para o laboratório (Embrapa Arroz e Feijão) e colocado em bandejas plásticas adicionando água até 2/3 da altura do anel até atingir a saturação (descanso por 24 horas). O solo saturado, quando submetido à diferentes rotações de centrifugação (30 minutos de centrifugação, seguido de pesagem para obtenção da massa úmida) tem o conteúdo de água decrescente. O último passo foi secar as amostras a 105 °C por 24h, para determinar a massa seca do solo, e assim obter a umidade em cada ponto, além da densidade do solo.

Foi considerado para obtenção das umidades na capacidade de campo e ponto de murcha permanente tensões de -6 kPa e -1500 kPa, respectivamente. Na Tabela 5 observa-se os parâmetros de ajuste da curva característica de retenção de água no solo pelo modelo de Van Genuchten (1980), a partir do potencial matricial em kPa e do conteúdo de água em $m^3 m^{-3}$.

Nestas tensões, as umidades nos pontos de capacidade de campo e murcha permanente foram de 0,312 e 0,225; 0,346 e 0,200; 0,347 e 0,282; 0,323 e 0,184, para as profundidades de 0,15; 0,35; 0,55 e 0,75 m, respectivamente.

Tabela 4. Parâmetros de ajuste da curva característica de retenção de água no solo pelo modelo de Van Genuchten (1980), a partir do potencial matricial em kPa e do conteúdo de água em $m^3 m^{-3}$.

parametros	0-0,15 (m)	0,15-0,35 (m)	0,35-0,55 (m)	0,55-0,75 (m)
θ_s	0,370	0,431	0,383	0,475
θ_r	0,150	0,146	0,271	0,146

A	2,0435	1,1514	0,5439	1,5930
M	0,0492	0,0592	0,0715	0,0900
N	2,6802	3,7218	4,9037	3,0903
R ²	0,995	0,986	0,993	0,999

θ_s : umidade do solo saturado; θ umidade residual do solo; α parâmetro de ajuste; m e n parâmetros de ajuste da equação, adimensionais; R² coeficiente de determinação.

3.4 CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO

Para a determinação do balanço hídrico foram instalados quatro sensores do tipo FDR, modelo EC-5 da Decagon Devices, nas profundidades de 0,15, 0,35, 0,55, e 0,75 m e três repetições (pontos distintos da área). Foi realizada a calibração dos sensores como sugerido pelo fabricante, que compara a umidade volumétrica medida pelos sensores (FDR), com os valores obtidos pelo método gravimétrico.

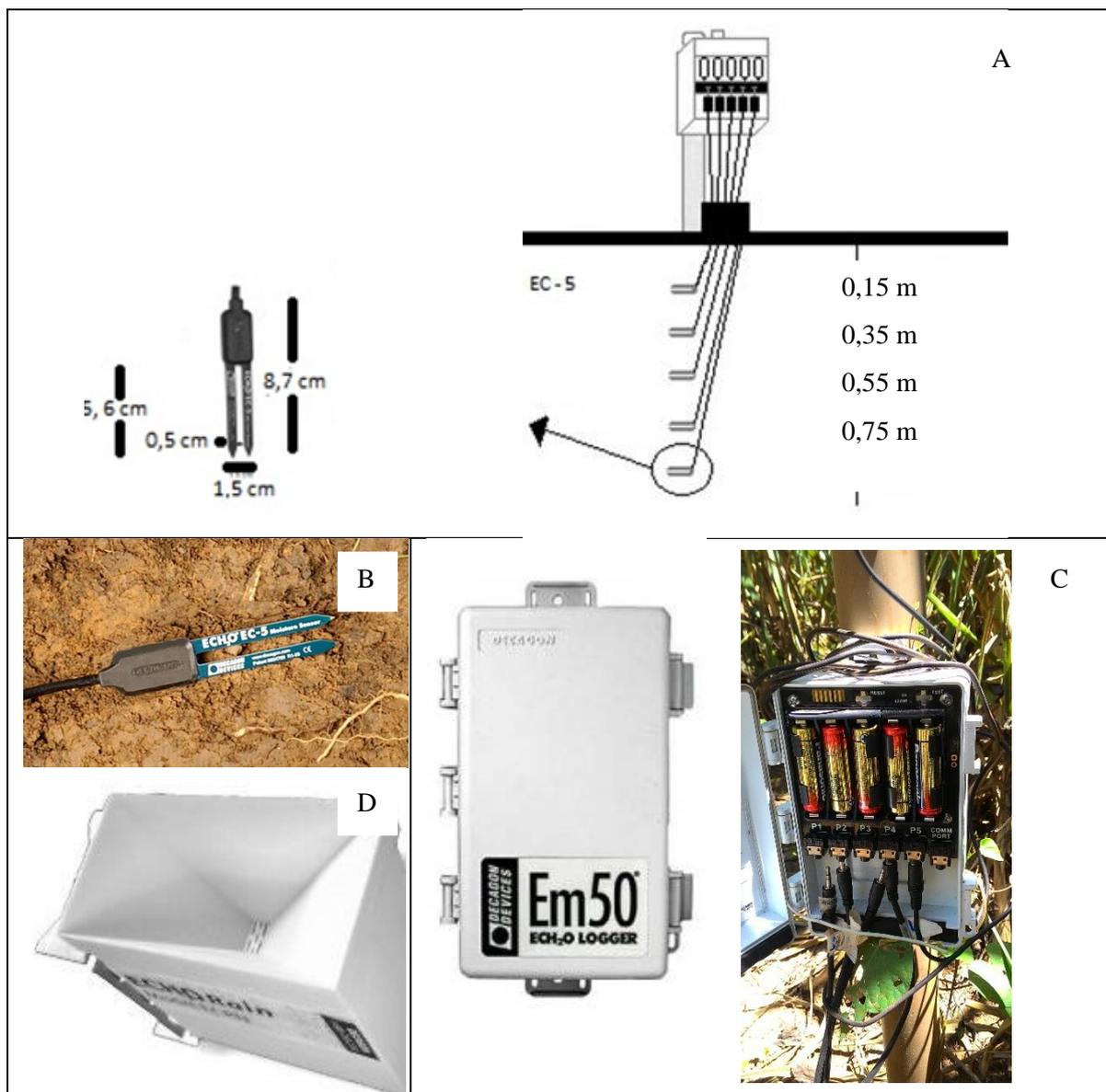


Figura 6. A: Croqui de instalação do sensor ECH₂O, B: modelo EC-5, nas profundidades 0,15, 0,35, 0,55, e 0,75 m, a 0,3 m da linha de plantio de cana cultivada em Goianésia, GO, 2016, Destaque para o C: datalogger EM50, D: sensor de chuva ECRN 50, E: Vista do acoplamento dos sensores de solo e pluviômetro no datalogger.

3.4.1 Calibração do sensor EC-5

A calibração dos sensores seguiu a recomendação do fabricante, Decagon, para expressar com maior exatidão os dados coletados através do datalogger Em50 na área experimental. Para a realização da calibração dos sensores, foram coletadas amostras indeformadas em cada profundidade de instalação dos sensores em cilindros com dimensões

de 0,07 m x 0,15m (diâmetro x altura) e em seguida levada para a estufa a uma temperatura de 105° C até a amostra atingir o peso constante para a determinação da densidade.

Após a determinação da densidade do solo, as amostras foram desestruturadas e adicionou-se de forma gradativa 1 cm³ de água para cada 10 cm³ de solo. O solo úmido foi homogenizado e retornado ao corpo de prova, para retornar a mesma densidade, e em seguida feito a leitura do sensor. Esse procedimento foi repetido até a amostra atingir a condição de saturação, resultando de 4 a 5 pontos de calibração.

A validação da calibração foi realizada através da análise de regressão, entre os conteúdos de água fornecido pelo sensor EC-5 e o método adotado como padrão (gravimétrico). Como índice de precisão da estimativa utilizou-se o índice de concordância “d” proposto por Willmott (1985).

3.4.2 Balanço hídrico utilizando sensores de umidade

O balanço hídrico em determinado volume de solo e pela lei de conservação das massas, num certo período de tempo (Libardi, 2005), é descrito pela Equação 16.

$$P + I \pm R \pm \Delta ARM - ET = 0 \quad (16)$$

Sendo P – precipitação pluvial (mm); I – irrigação (mm); Q – fluxo subsuperficial (mm); podendo ser ascendente (+) ou descendente (-) na base limite inferior do volume de controle; R – escoamento superficial (mm); ΔARM – variação de armazenamento de água no perfil de solo (mm); ET – evapotranspiração (mm).

Esta equação, porém, é usualmente rearranjada para deixar a evapotranspiração (ET, mm) como variável dependente (Equação 17):

$$ET = \Delta ARM - (P \pm Q \pm R) \quad (17)$$

Considerou-se que não houve escoamento superficial de água, devido ao solo apresentar declive suave e ser naturalmente bem drenado. Para registro da precipitação foram instalados 3 pluviômetros de balança modelo ECRN 5 da Decagon Devices, a 2,0 m de altura. Estes pluviômetros possuem uma área de captação de 50 cm² e uma balança de 5 cm³, com 1 mm de resolução. Cada bateria de sensores e o pluviômetro foram conectados a um datalogger EM-50 da Decagon Devices, sendo as leituras realizadas a cada hora.

O armazenamento acumulado de água no solo foi calculado pela regra 3/8 de Simpson, considerando que as medidas foram realizadas em intervalos igualmente espaçados, desde a superfície ($z = 0$) até a profundidade de interesse ($z = L$) (Libardi, 2005).

$$ARM = \int_0^1 \theta(Z) dZ = \frac{Z}{3} (\theta_0 + 4\theta_1 + \theta_2) \quad (18)$$

Sendo θ o conteúdo de água do solo, obtido com os sensores tipo FDR.

A variação no armazenamento de água no perfil de solo (ΔARM) foi determinada pela diferença dos valores do conteúdo de água do solo obtidos nos tempos inicial e final de cada período considerado, sendo expressa pela seguinte (Eq. 19):

$$\Delta ARM = [\theta_f - \theta_i]L = A_f - A_i \quad (19)$$

Sendo A_f e A_i os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

O fluxo total de água (Q), ou seja, as perdas por drenagem ($-Q$) ou os ganhos por ascensão capilar ($+Q$), de água da zona radicular por meio do limite inferior do volume de solo estudado ($z = 0,80$ m), respectivamente, foram determinados a partir da Equação 20:

$$Q = \int_0^t qtd = q \int_0^t dt = q(t - 0) = q\Delta t \quad (20)$$

Sendo q (mm d^{-1}) a densidade de fluxo de água no limite inferior do volume de solo delimitado pela zona radicular e dt o intervalo de tempo de estudo do balanço hídrico. As densidades de fluxo q foram estimadas com base na equação de Darcy-Buckingham (Equação 21)

$$Q = -K(\theta) \frac{\Delta\psi_r}{\Delta Z} \quad (21)$$

Sendo $K(\theta)$ (mm.d^{-1}) a condutividade hidráulica não saturada e $\Delta\psi_r/\Delta Z$ o gradiente de potencial total em $z = 0,55$ m, obtido pela Equação 23 abaixo:

$$\frac{\Delta\psi_t}{\Delta z} = \frac{\psi_{r0,15m} - \omega_{r0,75m}}{\Delta z} \quad (23)$$

Sendo ψ_t o potencial total da água no solo ($\psi_t = \psi_m + \psi_g$) e ΔZ igual a 0,80 m. O potencial gravitacional ψ_g (m de água) foi definido pela posição no solo, ou seja, igual à profundidade Z ; e o potencial matricial ψ_m (m de água), por meio da equação de Van Genuchten (1980) e dos dados da curva de retenção e dados da umidade atual do solo.

A curva de retenção foi obtida em laboratório usando-se centrífuga, de acordo com Embrapa (1997). Os dados das curvas de retenção da água no solo foram ajustados pela equação proposta por Van Genuchten (1980) (Equação 24)

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \times \psi m|^n]^{1 - \frac{1}{n}}} \quad (24)$$

3.5 TEMPERATURA FOLIAR

A temperatura foliar foi monitorada de outubro de 2015 a julho de 2016, com leituras mensais utilizando o termômetro digital laser infrared (marca: Fluke, modelo: 59 max+) (Figura 7), dotado de apontador a laser, a uma distância de aproximadamente 2,5 cm acima das folhas, com leituras entre 12:00 – 13:00 horas, amostrando três folhas em cada ponto um dos três pontos de monitoramento. Os valores de temperatura foliar indicados pelo termômetro foram comparados com a temperatura média do ar ambiente fornecido pela estação agrometeorológica (Figura 6) na ocasião da avaliação, como descrito por Jackson et al. (1977), Testi et al. (2008) e Trentin et al. (2011).



Figura 7. Termômetro digital laser de infravermelho (marca: Fluke, modelo 59 max+) utilizado para medir temperatura foliar da cana-de-açúcar, Goianésia,GO, 2016.

A escolha da folha a ser usada na mensuração seguiu sistema de numeração proposto por Kuijper (1915), Figura 8, que consiste em designar como +1 a primeira folha de cima para baixo, que se apresenta inserida com a aurícula (colarinho) bem visível. As folhas de baixo passariam a receber a numeração +2, +3, etc.

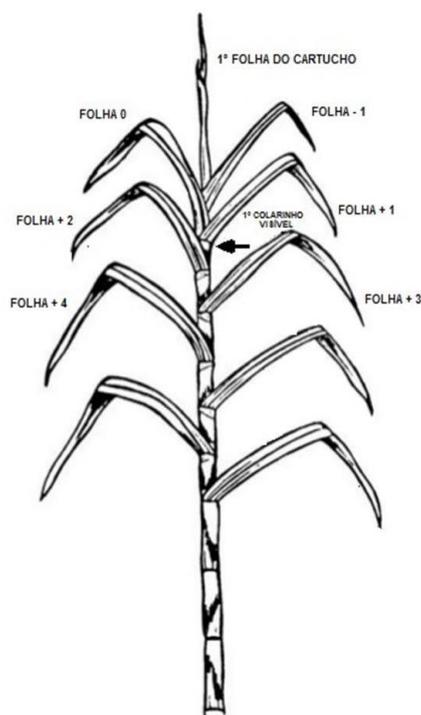


Figura 8. Sistema de numeração de folhas de cana-de-açúcar (Kuijper, 1915).

3.6 AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS

3.6.1 Altura de planta e diâmetro de colmos

As avaliações foram realizadas em três plantas, com três repetições, abrangendo os estádios fenológicos, crescimento e maturação da cultura, e suas variações no decorrer do período. O crescimento da cultura no período foi observado através das variáveis; (i) altura da planta, em cm, utilizando uma régua, da base até a folha + 1 e (ii) diâmetro do colmo, em mm, medido com paquímetro digital, rente ao solo.



Figura 9. Vista da medição de altura de planta de cana-de-açúcar, Goianésia, GO, 2016.

3.6.2 Números de perfilhos por metro linear

Contou-se os perfilhos das duas linhas centrais próximo as estações de monitoramento de umidade do solo, com instrumento contador e dividiu-se pelo número de metros das duas parcelas somadas conforme sugerido Bidoia & Bidoia (2008). Esta contagem foi feita mensalmente durante a duração do experimento.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O desempenho do método de estimativa de evapotranspiração pelo algoritmo (SAFER) foi avaliado correlacionando-se os dados estimados pelo sensoriamento remoto com os determinados através do balanço hídrico de água no solo (ETBHS) através de uma análise de regressão linear em que se consideraram os indicadores estatísticos, R-quadrado (Eq. 26), coeficiente de correlação simples de Pearson “r” (Eq. 27) e pelo índice de Willmontt “d”. O índice de concordância de Willmontt está relacionado ao afastamento dos

valores estimados em relação aos observados, variando de zero para nenhuma concordância, a 1,0 para a concordância perfeita, sendo determinado pela Equação 28 (Silva, 2011).

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(O_i - E_i)^2}{\Sigma(O_i - O)^2} \quad (26)$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{\Sigma(O_i - E_i)^2}{\Sigma(O_i - O)^2}} \quad (27)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\Sigma(P_i - O_1)^2}{\Sigma(|P_i - 0| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (28)$$

Sendo O_i o valor observado (ET_r estimada pelo balanço hídrico do solo), mm; E_i o valor estimado (ET_r obtida pelo SAFER), mm; O média dos valores observados, mm.

4 RESULTADOS E DICUSSÕES

4.1 DESENVOLVIMENTO E PRODUÇÃO DAS PLANTAS SEM RESTRIÇÃO HÍDRICA

O ciclo total da cultura (cana planta / 1º. ciclo) foi de 398 dias (Tabela 5). Fase 1 - Pegamento: 20 dias (do transplântio ao pegamento das mudas); Fase 2 - Perfilhamento: 80 dias (do pegamento das mudas ao pleno perfilhamento); Fase 3 - Desenvolvimento: 240 dias (do pleno perfilhamento ao início da maturação); e Fase 4 - Maturação: 58 dias (do início ao fim da maturação).

Tabela 5. Período, em dias, para cada fase de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar (IAC 91-1099), Goianésia, GO.

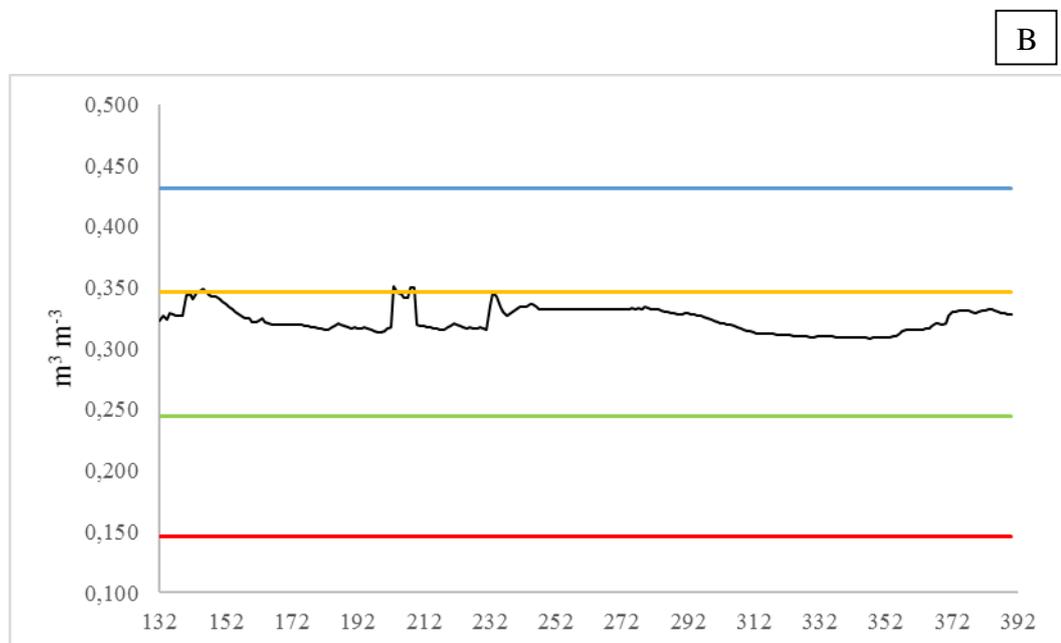
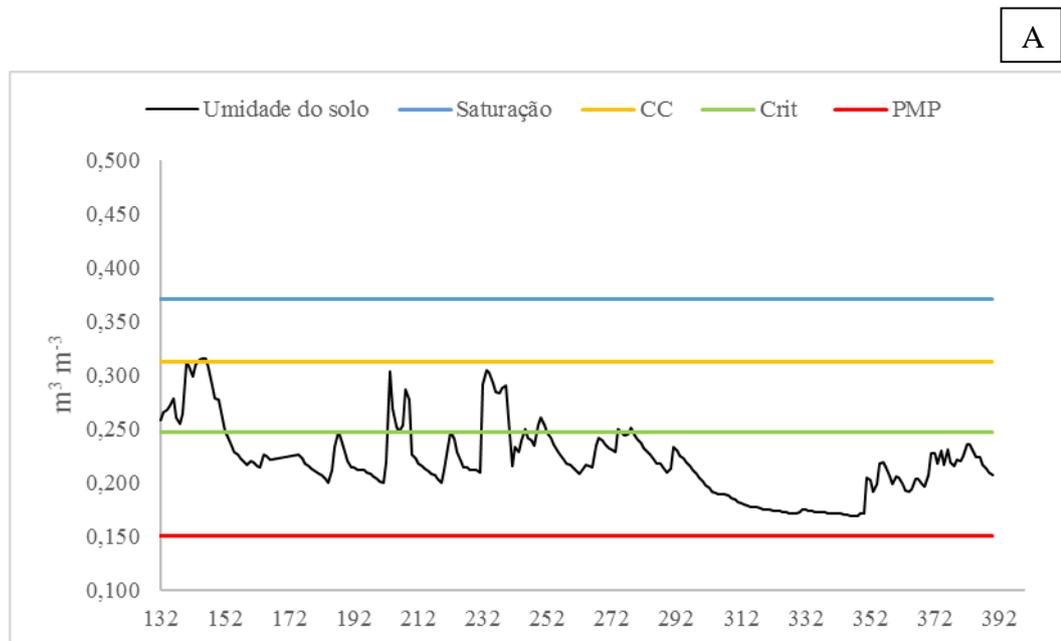
Fase/Período	Pegamento	Perfilhamento	Desenvolvimento	Maturação	Total
Início	10/06/2015	30/06/2015	18/09/2015	15/05/2016	
Final	30/06/2015	18/09/2015	15/05/2016	12/07/2016	
Período (dias)	20	80	240	58	398

A precipitação pluviométrica ao longo do período do cultivo da cana-de-açúcar foi de 1140,1 mm, concentrada de outubro/2015 a março/2016, não necessitando, portanto, de nenhuma irrigação nesse período chuvoso. O total de irrigação aplicada foi de 516,77 mm, repondo 413,41 mm no armazenamento de água no solo (80% eficiência), nos dois períodos de estiagem: os quatro primeiros meses (junho a setembro/2015) e os quatro meses finais (abril a julho/2016) do ciclo da cana.

De acordo com o manejo da irrigação realizado na área, observa-se que não houve restrição hídrica para as plantas ao longo do ciclo (Isso pode ser confirmado pelos dados de conteúdo de água no solo no perfil até 0,75 m (Figura 10).

A 0,15 m de profundidade foi registrada umidades do solo abaixo do ponto crítico e próximo do ponto de murcha permanente, em vários momentos ao longo do ciclo (Figura 10 A). Isso se explica pela alta perda de água por evaporação na camada superficial.

Já nas profundidades de 0,35, 0,55 e 0,75 m foram registradas umidades do solo, ao longo do ciclo da cultura, entre o ponto de capacidade de campo e o ponto crítico para a cultura (Figura 10 B, C e D). Isso evidencia que a água aplicada ao longo do ciclo foi suficiente para atender a demanda hídrica da cultura.



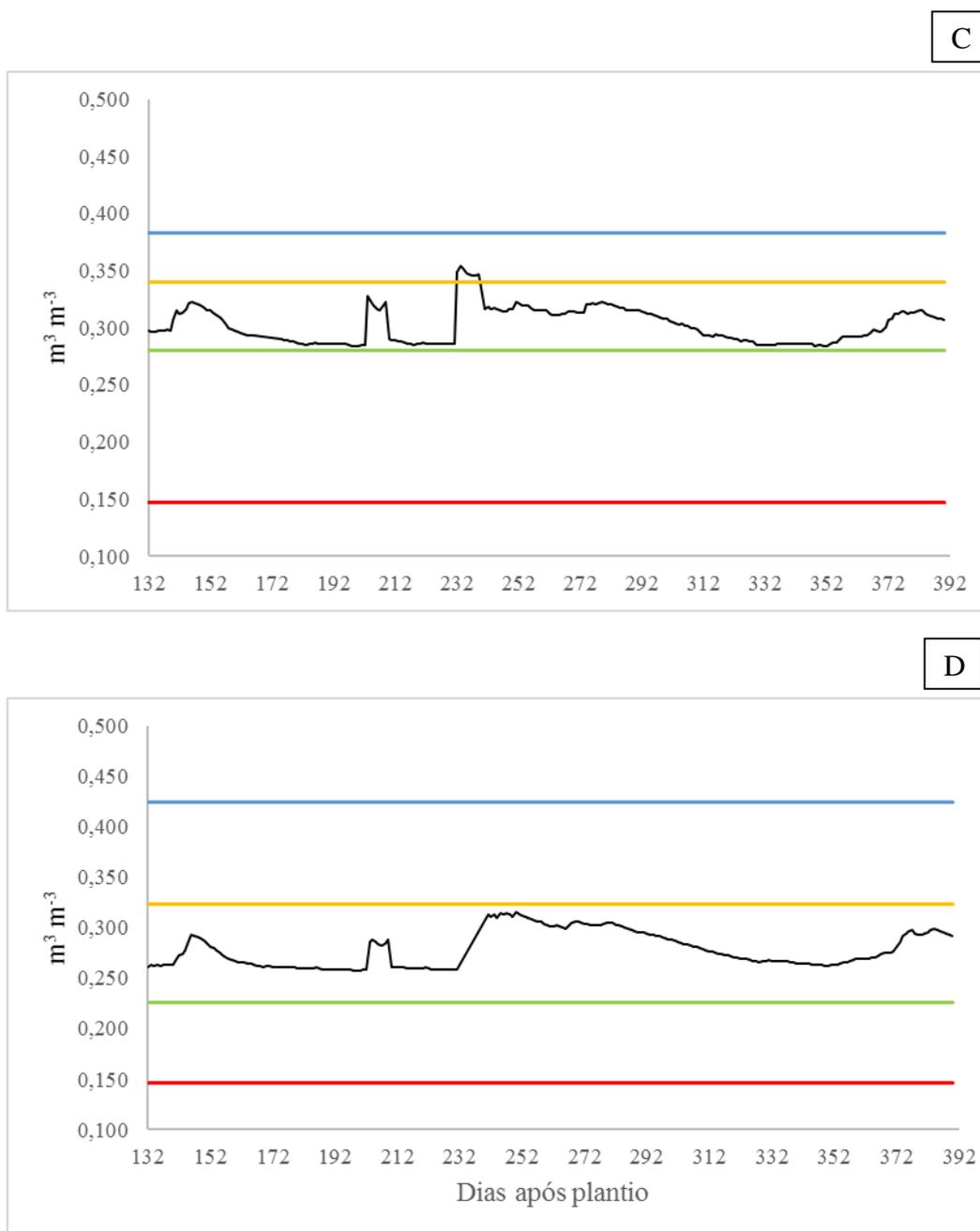


Figura 10. Conteúdo de água no perfil do solo, a 0,15 (A), 0,35 (B), 0,55 (C) e 0,75 (D) m de profundidade, ao longo do ciclo (398 dias) em Goianésia, GO. Destaque para os pontos de capacidade de campo (CC), de murcha permanente (PMP) e crítico (CRIT).

O adequado status hídrico das plantas, ao longo do ciclo, pôde ser verificado também pela temperatura. As plantas apresentaram temperatura inferior à temperatura do ambiente. A diferença de temperatura entre a folha e o ar atingiu uma diferença de até 5 °C (Figura 11). Esses resultados corroboram com os de Trentin et al. (2011), em estudo realizado em casa de vegetação com cana-de-açúcar, cultivar RB 86- 7515, em que as plantas

mantidas sob adequado fornecimento hídrico apresentaram temperaturas inferiores, em torno de 6,6 °C, quando comparadas àquelas sob condições de estresse hídrico severo e elevada radiação solar.

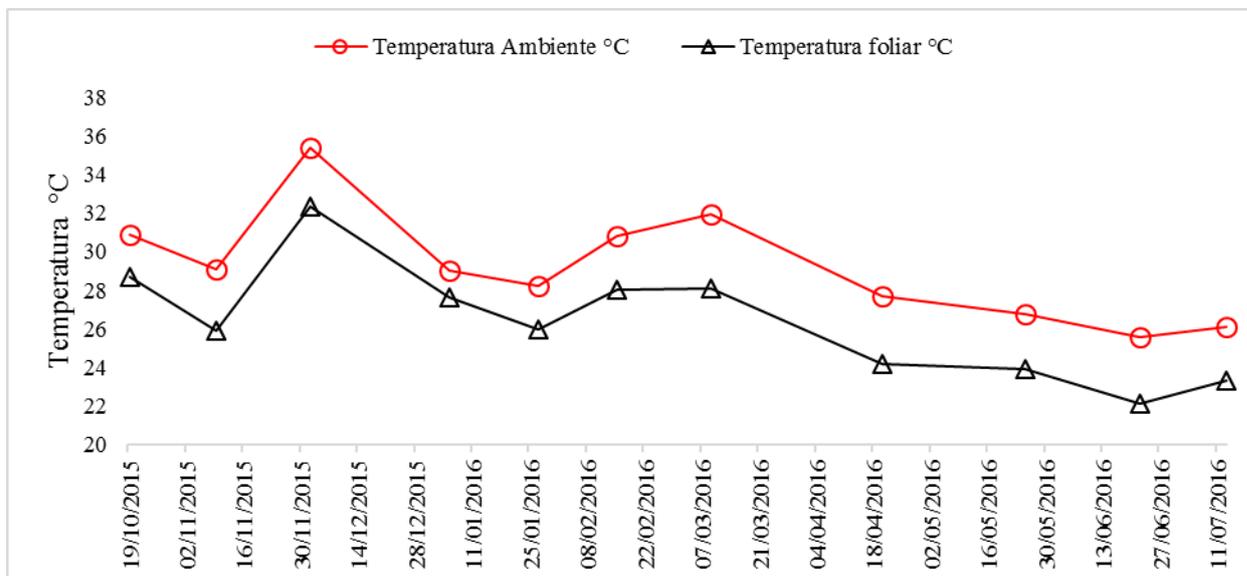


Figura 11. Dados de temperatura (°C) foliar e do ar, ao longo do ciclo de cana-de-açúcar (IAC 91 - 1099) em 1º. ciclo (irrigação plena), em Goianésia, GO (2015/2016).

A temperatura média do ar, ao longo do ciclo, foi de 25,2 °C (Figura 12). Essa temperatura ficou dentro dos valores ótimos para o desenvolvimento da cultura, que varia entre 22 a 30 °C. Valores acima de 38°C o crescimento da cultura é bastante lento. Temperatura inferior a 20 °C o crescimento se reduz, sendo esse valor a temperatura basal para a cultura da cana-de-açúcar (Humbert, 1968; Barbieri & Villa Nova, 1977; Magalhães, 1987; Doorenbos & Kassam, 1994).

A radiação solar diária média durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar foi de 25,89 MJ m² dia⁻¹, ficando entre as faixas ideais para o bom desenvolvimento e crescimento da cultura, que é entre 18 a 36 MJ m² dia⁻¹ (Sugarcane, 2016). A radiação solar é importante para o desenvolvimento da planta principalmente em seu crescimento e regime térmico, sendo responsável pelo incremento a produção de matéria seca da cultura.

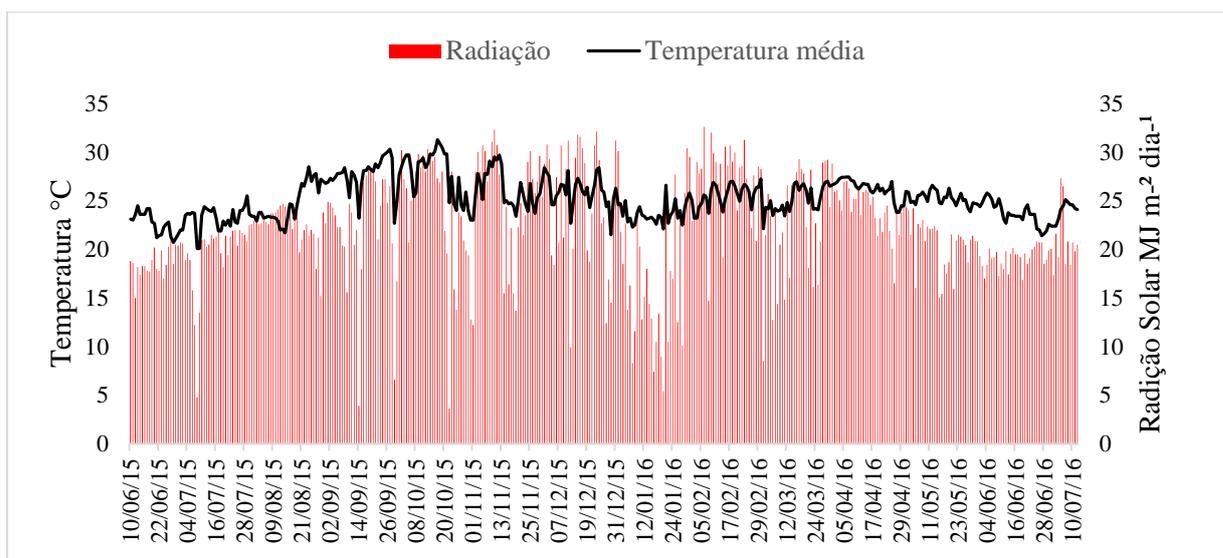


Figura 12. Temperatura média do ar e radiação solar global durante o ciclo da cultura da cana de açúcar (398 dias), Goianésia, GO (10/06/2015 a 12/07/2016)

As satisfatórias disponibilidades de água e energia, ao longo do ciclo, proporcionaram um normal desenvolvimento e produtividade do canavial.

A altura das plantas e o diâmetro dos colmos apresentaram crescimento normal para variedade, variando de 1,7 a 2,7 m, e 1,5 a 3,7 cm, (outubro/2015 a julho/2016), respectivamente (Figura 16). Este crescimento foi superior ao encontrado para a mesma variedade para a região de Tiête-SP, que atingiram altura de 2,32 m e diâmetro de colmo de 2,8 cm ao final do ciclo (Camargo et al., 2010).

A produtividade média da cultura da cana-de-açúcar (IAC 91 – 1099) foi de 127,83 t ha⁻¹, ficando acima da média nacional que é de 73,22 t ha⁻¹ (CONAB, 2016). Esse acréscimo de produtividade foi devido ao manejo da irrigação plena, com reposição de 413,41 mm de irrigação ao longo do ciclo. De acordo com a literatura, irrigando acima de 300 mm no ciclo é de se esperar um aumento de produtividade de no mínimo 25 a 40 t ha⁻¹ (Santos & Frizzone, 2006; Dantas Neto et al., 2006, Pereira et al., 2015). Quando comparados com outros estudos utilizando a mesma variedade e similar manejo da irrigação, a produtividade obtida é semelhante: 118,12 t ha⁻¹ (Oliveira et al., 2010) e 115 t ha⁻¹ (Silva et al., 2014).

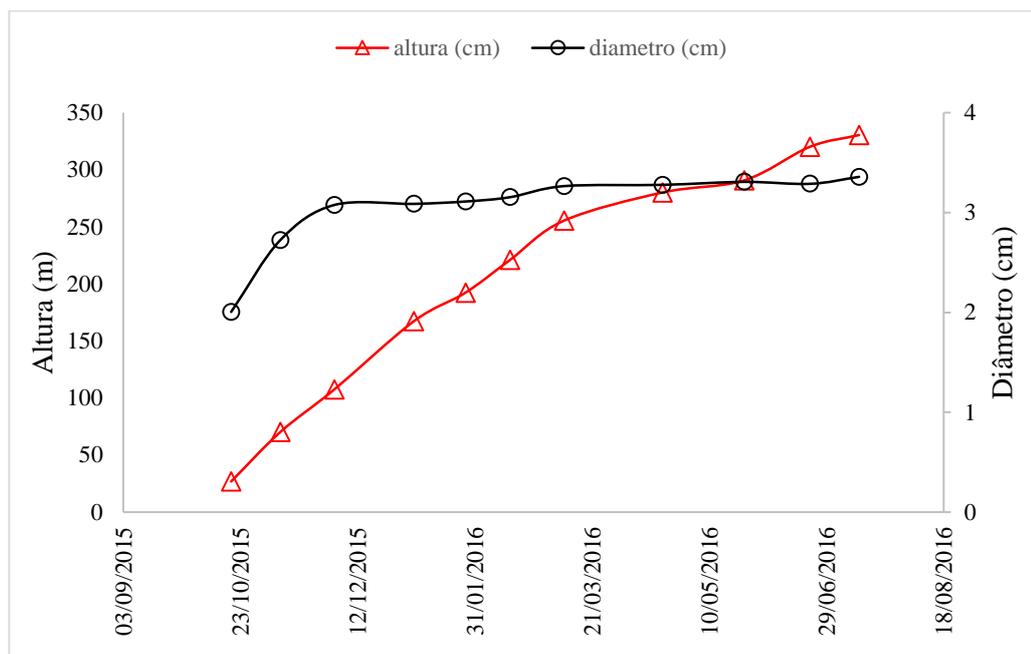


Figura 13. Dados de altura de planta e diâmetro de colmo ao longo do ciclo na cultura da cana-de-açúcar entre os períodos de outubro de 2015 e julho de 2016, Goianésia, GO.

Os indicadores de qualidade da produção, análise tecnológica (Tabela 6), também mostraram resultados dentro dos padrões tradicionalmente estabelecidos (Ripoli & Ripoli, 2004). O grau BRIX foi de 18,21; pureza de 87%, ATR de 138,1 kg t⁻¹ e fibra de 13,6%. Resultados semelhantes também foram encontrados por Silva et al. (2014) em canaviais sem restrição hídrica.

Tabela 6. Indicadores de qualidade para a cultura da cana-de-açúcar e valores obtidos para a variedade IAC 91 10-99 na safra de 2015/2016 em uma área de irrigação plena por pivô central de 100 ha, em Goianésia, GO.

Indicadores	Valores Recomendados (Ripoli & Ripoli, 2004)	Valores Obtidos
POL	>14	18,12
Pureza	>85%	87,02
AR(glicose, frutose)	<0,8%	0,54
Fibra	11 a 13%	13,4
ATR	>15% (maior possível)	149,22
BRIX	18	18,4

4.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cultura da cana-de-açúcar apresentou uma demanda hídrica estimada de 1077,56 mm e 1278,9 mm, ao longo de todo o ciclo (Junho/2015 a Julho/2016), pelos métodos FAO 56 e SAFER, respectivamente.

Para o período de outubro/2015 a Julho/2016 (período com sensores de umidade do solo em campo) também foi possível obter a evapotranspiração por balanço hídrico de água no solo (ETBHS). Assim, a evapotranspiração acumulada do canavial, para esta parte do ciclo, foi de 753 mm, 791,33 mm e 1004,5 mm, pelos métodos ETBHS, FAO 56 e SAFER, respectivamente. No período chuvoso (novembro/2015 a março/2016), das dez passagens do satélite sobre a área (passagem do LANDSAT 8 de 16 em 16 dias), foi possível estimar apenas dois (17/dezembro/2015 e 19/fevereiro/2016) dados de evapotranspiração pelo SAFER devido à presença de nuvens. Os dados perdidos foram estimados por interpolação. Observa-se que o SAFER superestimou em 251,5 mm e 213,17 mm (33%) em comparação aos ETBHS, IRRIGER, respectivamente.

De maneira geral, observou-se que o método ETBHS em dias de grande ocorrência na chuva, apresentou uma tendência de superestimar os valores de evapotranspiração em relação aos demais métodos. Observa-se (Figura 14) que em 19 de fevereiro/2016 o ETBHS estimou em $6,8 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto SAFER e IRRIGER estimaram em 27% a menos, 5,35 e 5,36 mm dia^{-1} , respectivamente.

Para o período entre março a julho/2016 (período predominantemente sem chuvas e sem presença de nuvens) foi possível comparar melhor os três métodos. O método SAFER, novamente, teve uma tendência de superestimativa em alguns dias atingindo até 57,14% em relação a ETBHS. Observa-se que pelo SAFER em 07 e 23 de abril de 2016 as evapotranspirações foram estimadas em 3,5 e 2,8 mm dia^{-1} , respectivamente. Enquanto, pelo ETBHS foram estimadas em 2,12 e 1,2 mm dia^{-1} , seguindo essa tendência até o final do ciclo (Figura 14).

Comparando os métodos ETBHS e IRRIGER, a evapotranspiração baseada no KC da irrigar obteve uma superestimativa menor do que o método SAFER, em que atingiu no máximo 23,18% em relação ao ETBHS. Observa-se que na data de 07 de abril de 2016 a FAO 56 estimou 2,76 mm dia^{-1} , enquanto a ETBHS estimou em 2,12 mm dia^{-1} . Essa superestimativa no final do ciclo da cultura é explicado pela alta ocorrência de tombamentos das plantas devido a presença de rajadas de ventos, desta forma, o algoritmo estimou a

evapotranspiração baseado na temperatura de palhada e de colmos, sendo que o normal é baseado na temperatura foliar.

De forma geral, o método SAFER superestimou ETBHS em 22,89 % e o método baseado na IRRIGER superestimou ETBHS em 12,54 %.

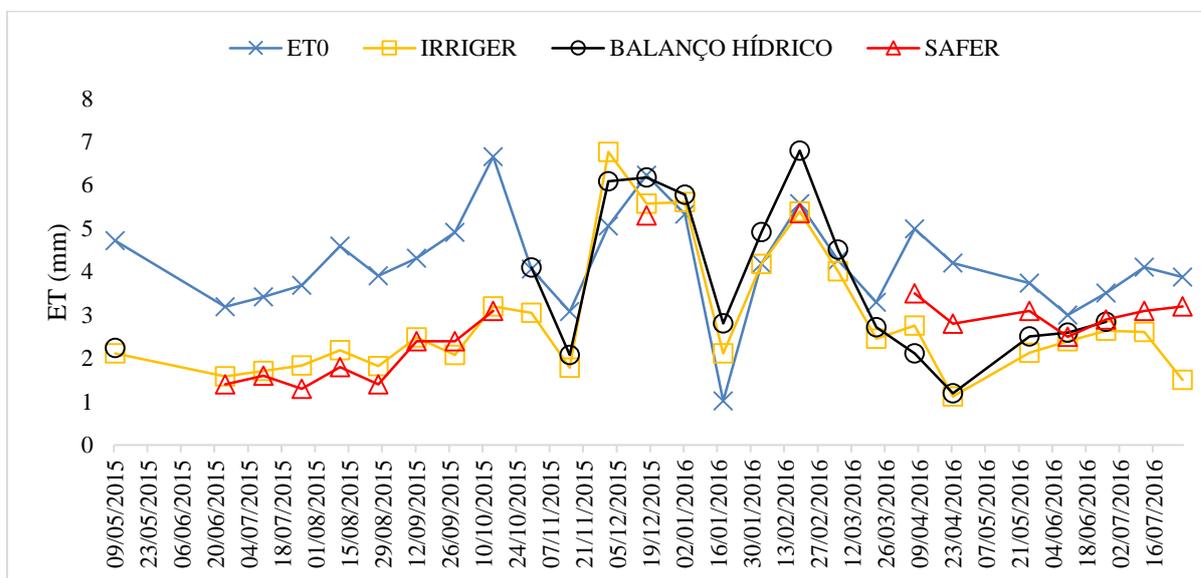


Figura 14. Evapotranspiração da cultura pelos diferentes métodos (ET₀, ETBHS e IRRIGER) no período de outubro de 2015 a junho de 2016 em cultura de cana-de-açúcar na cidade de Goianésia – GO.

Na Tabela 7, mostra os valores de evapotranspiração de referência (ET₀), evapotranspiração da cultura (ET_c) pelos métodos IRRIGER, SAFER e balanço de água no solo, ao longo do ciclo da cana-de-açúcar.

Tabela 7. Evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar (IAC91-1099) nas datas e pontos amostrados nas imagens Landsat 8. Goianésia, GO, 2015-2016.

DAP	DATA	ET ₀ (mm dia ⁻¹)	K _c (*)	K _C (SAFER)	KS	ET _C (mm dia ⁻¹)	ETBHS (mm dia ⁻¹)	ETA (SAFER) (mm dia ⁻¹)
14	24/06/15	3,19	0,5	0,4	1	1,59	-	1,4
30	10/07/15	3,42	0,5	0,42	1	1,71	-	1,6
46	26/07/15	3,69	0,5	0,45	1	1,84	-	1,3
62	11/08/15	4,59	0,52	0,5	0,92	2,19	-	1,8
78	27/08/15	3,91	0,59	0,55	0,78	1,82	-	1,4
94	12/09/15	4,31	0,68	0,63	0,85	2,49	-	2,4
110	28/09/15	4,91	0,76	0,72	0,56	2,08	-	2,4
126	14/10/15	6,66	0,84	0,8	0,57	3,2	-	3,1
142	30/10/15	4,06	0,92	-	0,82	3,05	4,1	-
158	15/11/15	3,08	1	-	0,58	1,79	2,08	-
174	01/12/15	5,06	1,08	-	0,69	6,77	6,09	-
190	17/12/15	6,23	1,08	1,02	0,82	5,57	6,18	5,3
206	02/01/16	5,33	1,05	-	1	5,61	6,75	-
222	18/01/16	1,02	1,02	-	1	2,12	2,81	-
238	03/02/16	4,19	1	-	1	4,18	4,92	-
254	19/02/16	5,57	0,99	0,98	1	5,39	6,8	5,35
270	06/03/16	4,27	0,94	-	1	4,01	4,51	-
286	22/03/16	3,3	0,91	-	0,82	2,46	2,72	-
302	07/04/16	4,99	0,88	0,94	0,62	2,76	2,12	3,8
318	23/04/16	4,2	0,85	0,87	0,31	1,12	1,20	2,8
334	09/05/15	4,72	0,84	-	0,70	2,12	2,24	-
350	25/05/16	3,74	0,8	0,84	0,69	2,13	2,51	3,1
366	10/06/16	3	0,8	0,81	1	2,4	2,60	2,5
382	26/06/16	3,51	0,8	0,8	0,94	2,64	2,85	2,9
398	12/07/16	4,11	0,8	0,8	0,8	2,61	-	3,1
414	28/07/16	3,88	0,8	0,74	0,49	1,51	-	3,2

*Coeficiente de cultura tradicionalmente utilizado pela usina.

A Figura 15 mostra os mapas gerados de ETa a partir do SAFER, durante o ciclo da cultura de junho/2015 a julho/2016. De acordo com a variação do estágio de desenvolvimento da cultura, ocorre também a variação da evapotranspiração atual da cultura (ETa). Observa-se que os maiores valores de ETa foram encontrados no período em que a cultura da cana-de-açúcar encontrava-se em pleno desenvolvimento, entre os meses de dezembro/2015 e janeiro/2016 em que a ETa atingiu valores próximos de 6 mm e o acumulado nesse período foi de 324,7 mm. Os menores valores foram encontrados no período de estabelecimento da cultura, também chamado de fase inicial em que o acumulado nesse período foi de 54,11 mm. Após 300 dias do transplante das mudas em campo, a ETa

começou a ter um decréscimo saindo de 4,7 mm dia⁻¹ seguindo assim até o final do ciclo onde a ETa foi de 3,2 mm dia⁻¹. Esse fato está associado ao início da senescência das plantas, no qual ocorre uma redução do índice de área foliar e como consequência a redução da ETa. Nas primeiras imagens nota-se que há uma grande heterogeneidade causada pela não cobertura total do solo devido a juvenilidade das plantas e por falhas de plantio dentro da área do pivô, ocasionando faixas sem a cobertura vegetal principalmente na parte central das imagens. As imagens traz tons de cores diferentes derivadas do vermelho e verde, em que, as faixas de vermelho correspondem a menores valores e a verde com maiores valores de ETa.

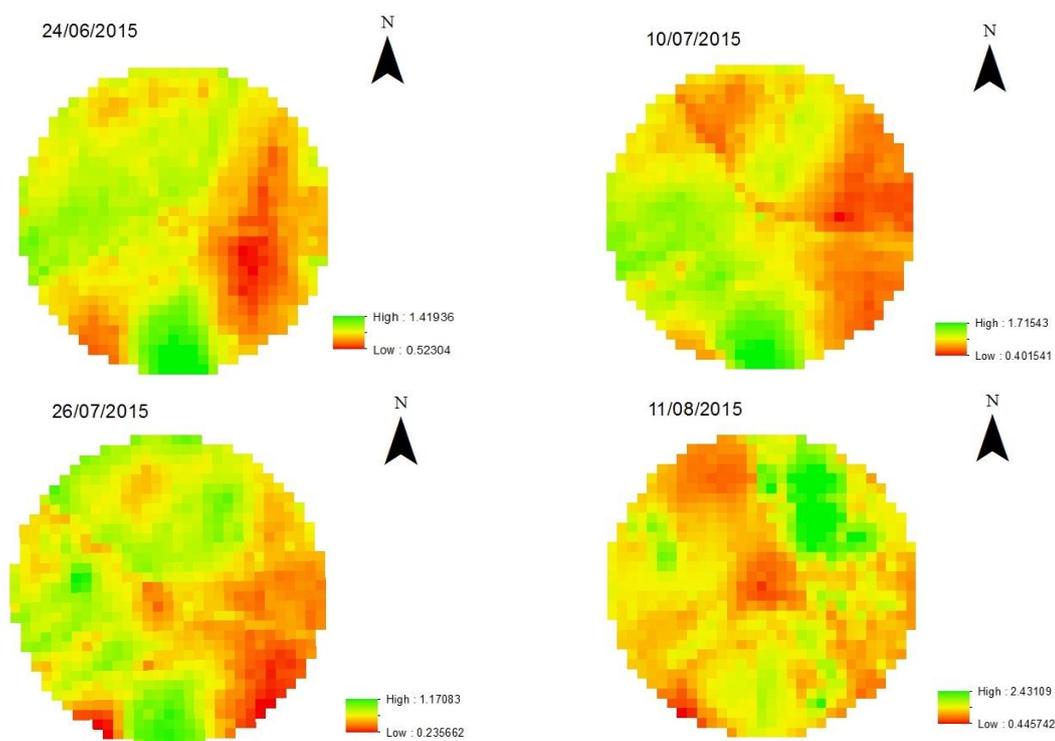
Tabela 8. Componentes do balanço hídrico em cana-de-açúcar de 21 de outubro de 2015 a 3 de agosto de 2016 na camada de 0-0,55 m, Goianésia, GO.

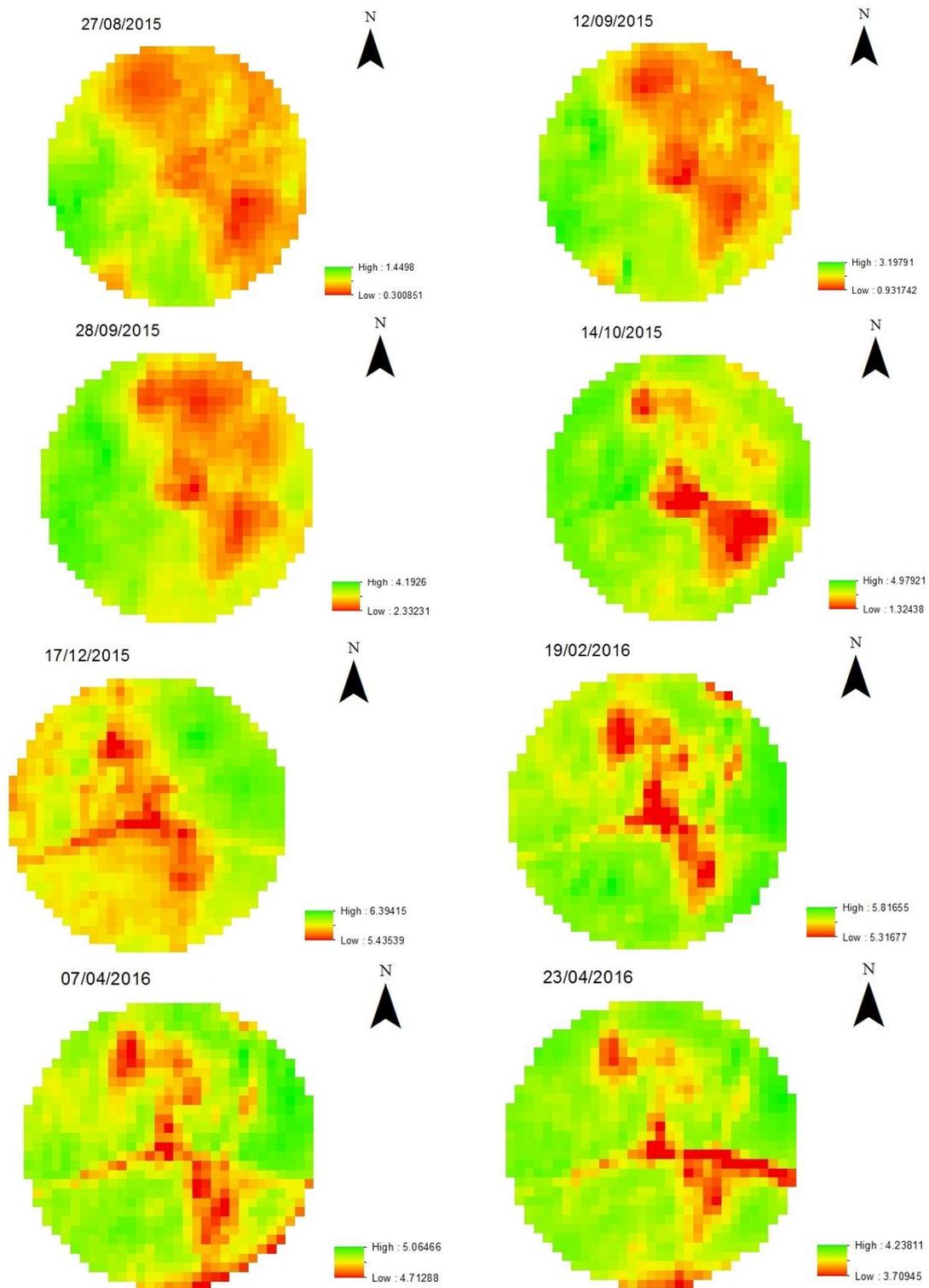
Subperíodo	ΔArm (mm dia ⁻¹)	P (mm dia ⁻¹)	ET_r (mm dia ⁻¹)
21/10/2015	-1,637	0	-6,363
06/11/2015	-2,504	0	-5,504
22/11/2015	-0,281	0	-8,281
08/12/2015	-0,495	0	-0,495
24/12/2015	-0,349	0	-0,349
09/01/2016	0,622	4	-9,622
25/01/2016	-0,064	0	-0,064
10/02/2016	-1,843	0	-6,157
26/02/2016	-0,472	0	-4,254
13/03/2016	0,846	1	-10,528
29/03/2016	-0,274	0	-0,846
14/04/2016	-0,036	0	-0,274
30/04/2016	-0,026	0	-0,036
16/05/2016	-1,142	0	-0,026

01/06/2016	-2,801	0	-5,142
17/06/2016	-0,679	0	-9,801
03/07/2016	-0,886	0	-0,679

A evolução dos componentes do balanço hídrico do solo é apresentada na Tabela 8. O armazenamento de água no solo (ΔArm) corresponde ao saldo de água no solo, no intervalo de tempo considerado; se as entradas (precipitação e ascensão capilar) de água no volume de solo forem maiores que as saídas (evapotranspiração e drenagem) o ΔArm será positivo, caso contrário será negativa. A variação de armazenamento apresentou uma variação de -0,026 a -2,801 nos meses de abril e junho, respectivamente. Os maiores valores de armazenamento ocorreram quando foram realizado irrigações e/ou ocorreu precipitações nos dias que antecederam os subperíodos.

Quando observa-se a ET_r , nota-se que os maiores valores foram encontrados também quando teve ocorrência de chuva ou irrigação nos dias anteriores ou no próprio dia do subperíodo, fazendo com que o solo estivesse com um maior volume de água armazenado, como nota-se nos dias 9/01 e 13/03 de 2016.





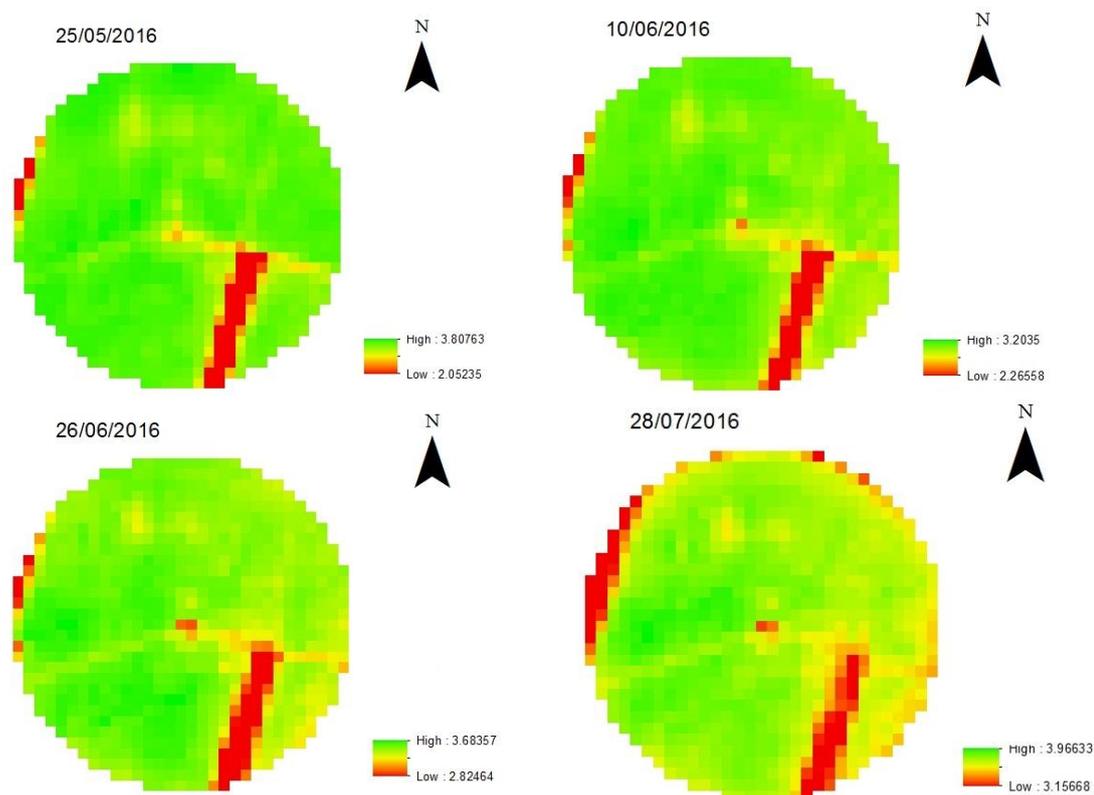


Figura 15. Mapas de evapotranspiração atual pelo modelo SAFER referente ao período de junho de 2015 a julho de 2016, cultura de cana-de-açúcar irrigada por pivô central, Goianésia, GO.

Quando compara-se os dados de ETa obtido pelo SAFER com dados de ETc seguindo o modelo da IRRIGER como observa-se na Figura 18, nota-se uma similaridade entre os métodos, com o “R²” atingindo o valor de 0,54, “r” de 0,74 e “d” de Willmott de 0,98. Os valores de “R²” e “r” apresentam moderada correlação, já o “d” de Willmott de 0,98 ficando muito próximo de 1, indicando forte correlação entre ETa e ETc. Como pode-se observar na Figura 20, os dados apresentam maior similaridade até por volta de 250 dias após o plantio, após isso os dados tendem a apresentar uma maior diferença entre os valores de ETc e dados estimados por ETa. Este fato é ocasionado também pela entrada das plantas em senescência que é o processo natural de envelhecimento a nível celular fazendo que haja a redução do índice de área foliar alterando a estrutura das folhas e dificultando a determinação pelo SAFER, e pela alta incidência de tombamentos das plantas que foi observado em campo.

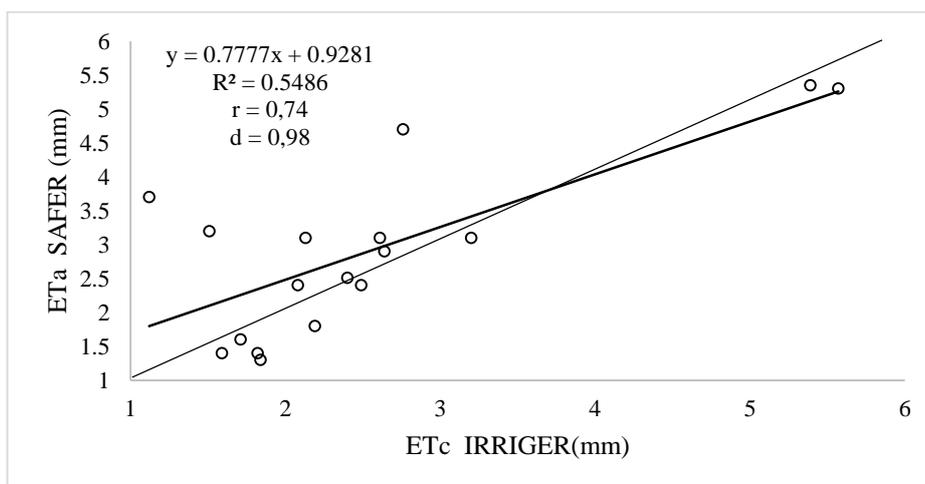


Figura 16. Comparativo da ETc estimada pelo método IRRIGER (Allen et al., 1998), com evapotranspiração estimada atual (ETa) utilizando o SAFER.

De acordo com a Figura 16, quando os dados são apresentados de forma distintas, ou seja, separando em períodos de 0 a 250 dias após o plantio e de 250 até o final do ciclo, nota-se claramente que há uma forte correlação nos primeiros 250 dias de cultivo, sendo o “R²” de 0,9757, “r” de 0,9877 e “d” de Willmott de 0,9928, evidenciando a alta correlação entre os dados. Quando se compara os dados de ETc com os dados estimados pelo SAFER após o início da senescência que corresponde entre 250 a 300 dias após o plantio da cultura, “R²” de 0,045 e “r” de 0,21 não apresentando boa correlação, apenas o “d” de Willmott que apresenta resultado de 0,96, que é próximo a 1 e apresenta forte correlação entre as médias.

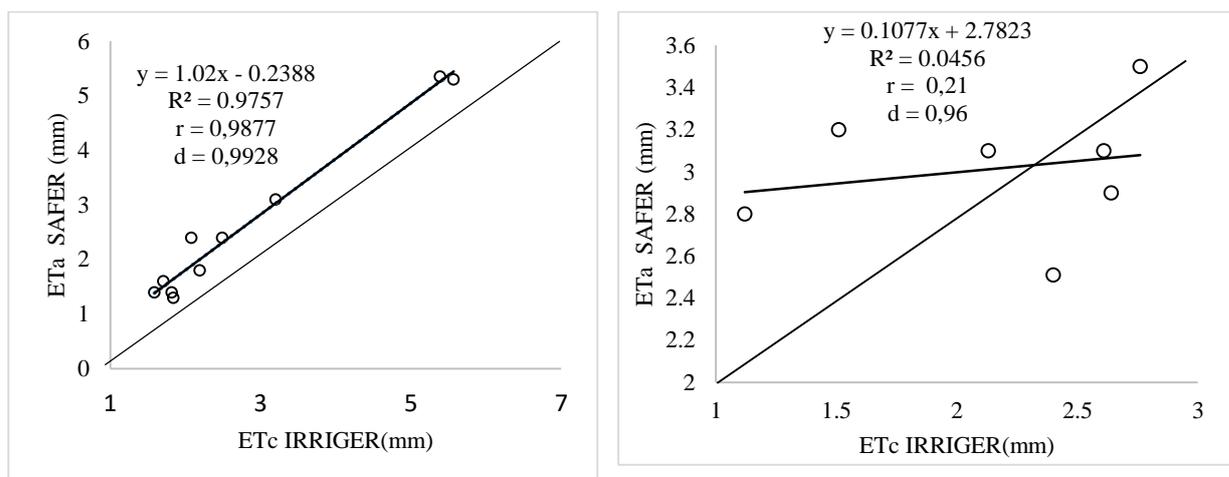


Figura 17. Dispersão de dados entre ETc determinado pela FAO 56 e ETa estimado pelo SAFER (A: de 0 a 250 dias; B: de 250 até o fim do ciclo).

Quando se compara a evapotranspiração obtida através do balanço hídrico do solo (ETBHS) com a evapotranspiração da IRRIGER nota-se uma similaridade nos dados (Figura 18 A) entre os meses de dezembro de 2015 e julho de 2016. Há uma relação moderada entre os dados (Figura 18 B), apresentando “R²” de 0,9097, “r” de 0,9537 e “d” de Willmott de 0,9507. A evapotranspiração obtida pelo SAFER obteve uma boa correlação com os dados de evapotranspiração obtidos através do balanço hídrico do solo, obtendo um “R²” de 0,8182; “r” de 0,9045 e “d” de Willmott de 0,9603. Souza et al. (2016) trabalhando com cana-de-açúcar em sequeiro, com o clima semelhante ao do estudo, obteve resultados semelhantes, o método para a estimativa de evapotranspiração pelo SAFER foi classificado como muito bom, apresentando o “R²” de 0,90, “r” de 0,95 e “d” de Willmott de 0,88. O monitoramento da quantidade de água no solo através dos sensores de umidade começou em outubro de 2015, desta forma o comparativo dos dados de ETa SAFER e ETBHS não pôde ser realizado durante todo o ciclo da cultura, ressalta-se ainda a ocorrência de nuvens em algumas determinadas datas de passagem do satélite, reduzindo ainda mais a quantidade de dados comparados. De forma geral, a maioria dos dados comparados foram realizados quando a cultura da cana-de-açúcar já se encontrava em pleno desenvolvimento e no período em que a cultura começou a entrar em senescência, sendo assim, os valores de ETa tenderam a superestimar os dados quando comparados a ETc FAO e ETBHS (Figura 20 C).

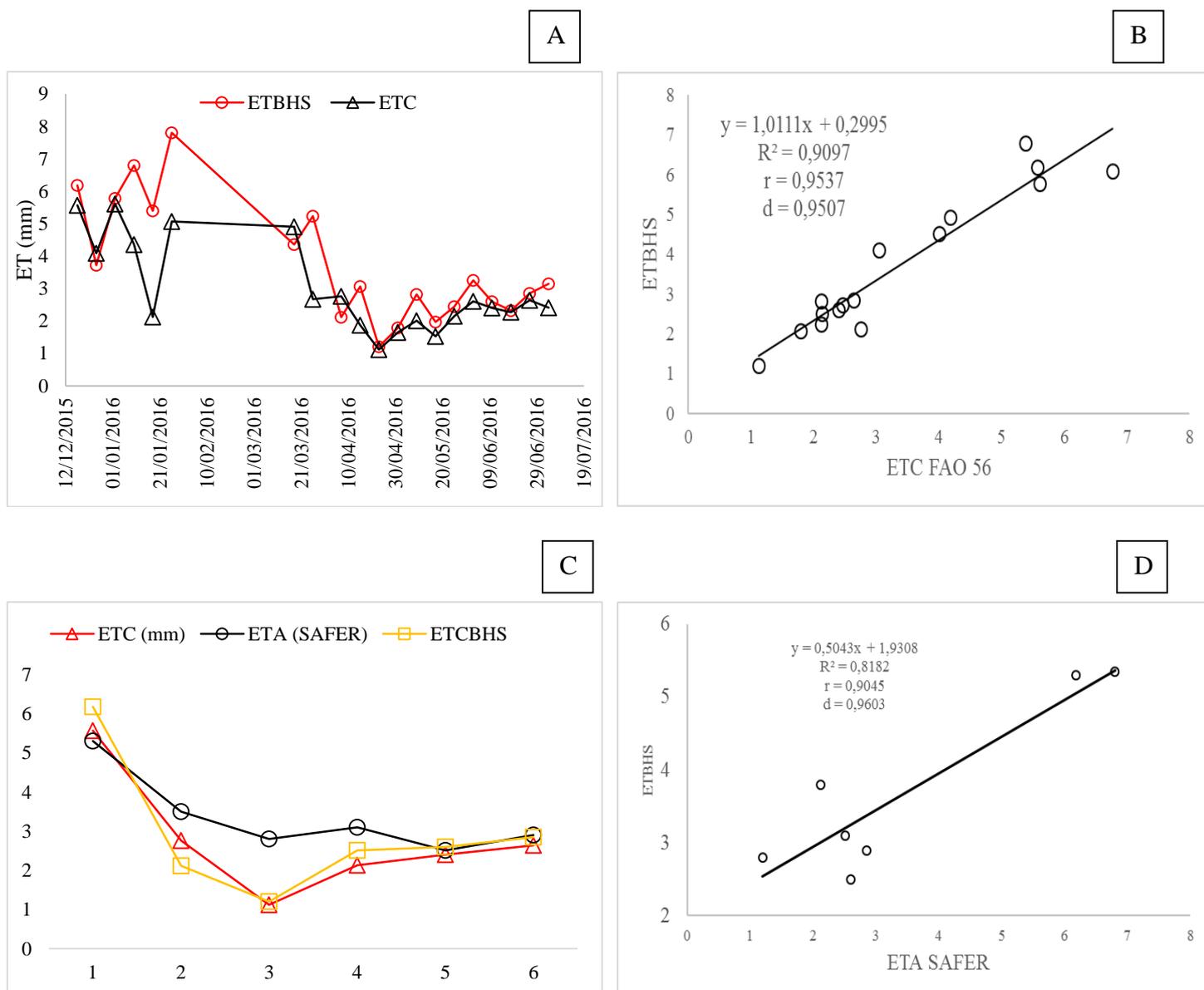


Figura 18. A e B: Comparativo entre ET_C IRRIGER e ETBHS ao longo do ciclo da cultura da cana-de-açúcar; C: Evapotranspiração real da cana-de-açúcar (IAC 91 – 1099) estimada pelo SAFER (ET_{SAFER}), balanço hídrico ET_{cBHS} e ET_C IRRIGER, Goianésia, GO, 2015/2016 e D: Comparativo da evapotranspiração pelo balanço hídrico do solo (ET_{cBHS}), e a ET_c SAFER, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Os dados de coeficiente de cultura obtidos pelo SAFER quando comparados aos coeficientes de cultura recomendados por Allen et al. (1998) apresentaram o coeficiente de determinação $R^2 = 0,9625$, sendo a curva de regressão linear a que melhor se ajustou aos dados, a correlação de Pearson “r” apresentou valor de 0,98 e o índice de Willmott “d” =

0,96. Tais valores apresentaram bons ajustes, aproximando de 1, o que mostra que os dados apresentam forte correlação entre as variáveis analisadas. A partir destes dados, o algoritmo SAFER mostra boa consistência quando se pretende avaliar o coeficiente de cultura para a cana-de-açúcar como observa-se na Figura 19. Desta forma recomenda-se o uso do algoritmo para a determinação de K_c . O SAFER quando utilizado em outros estudos, com outra cultura, também se mostrou uma boa ferramenta para determinar o coeficiente da cultura. Sales et al. (2016) trabalhando com o feijoeiro obteve uma boa correlação entre os dados estimados pelo SAFER e dados de evapotranspiração obtidos utilizando metodologia da IRRIGER, apresentando um “ R^2 ” de 0,98, “ r ” de 0,99 “ d ” de Willmott de 0,97 o que mostra que o SAFER determina evapotranspiração atual independente da cultura.

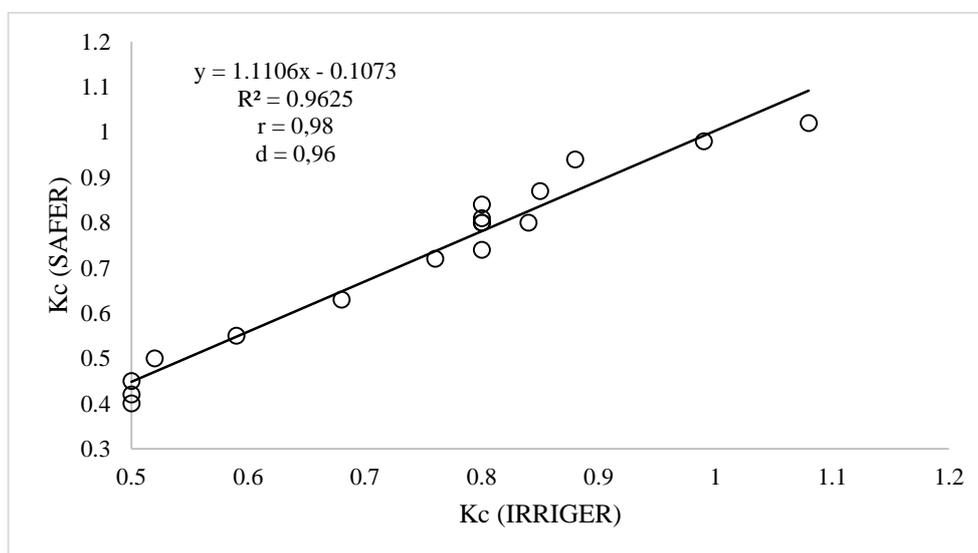


Figura 19. Gráfico de dispersão de dados de coeficiente de cultura obtidos pelo SAFER e pela FAO 56.

Os valores obtidos do NDVI (Figura 20) estão contidos em uma mesma escala de valores entre -1 e +1. Uma peculiaridade atribuída ao NDVI é sua rápida saturação que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento, ou seja, o índice estabiliza em um patamar apresentando um mesmo valor, embora com o aumento da densidade do dossel, entre os dias 200 e 350 após o transplante. A amplitude de valores encontrados durante o ciclo da cultura ficou entre 0,12 e 0,8, sendo que o ponto mais alto (0,8) foi encontrado no mês de abril. Sugawara et al. (2011) estudando o NDVI obtido a partir de dados do sensor MODIS/Terra verificaram uma variação de NDVI entre 0 e 0,99 ao longo de dois anos em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Avaliando o

NDVI obtido do satélite AVHRR/NOAA; Romani et al. (2011) verificaram valores entre 0,2 e 0,8 em talhões de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, o que evidencia que os valores encontrados estão semelhantes a encontrados em outros estudos.

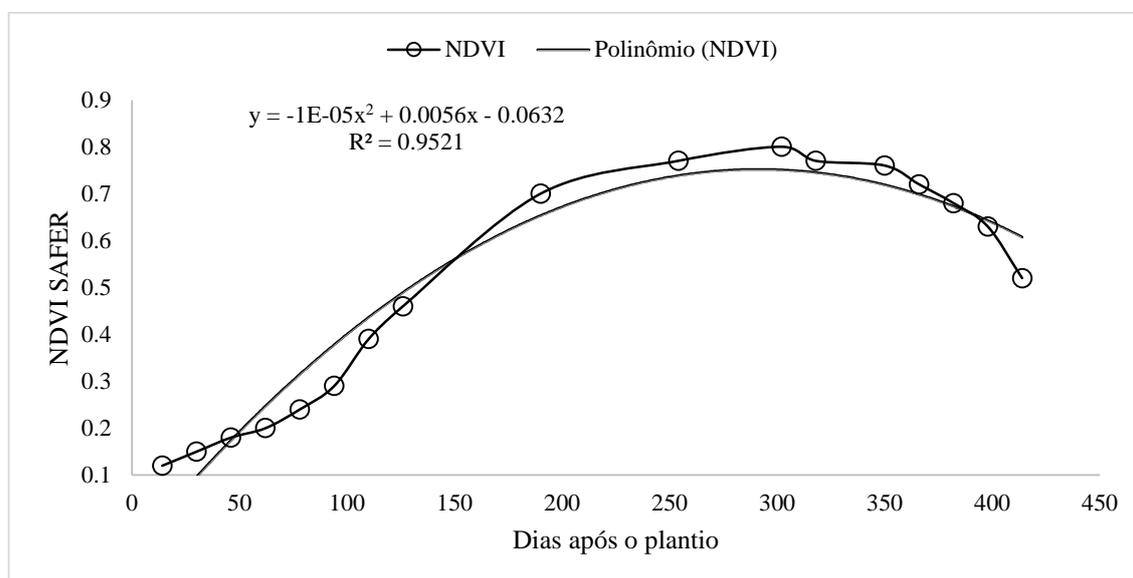


Figura 20. NDVI obtido pelo algoritmo SAFER em função dos dias após o plantio da cultura da cana-de-açúcar.

4 CONCLUSÕES

Em geral, para estimativa da evapotranspiração da variedade IAC 91-1099 de cana de açúcar, cultivada em Goianésia-Go em área irrigada por aspersão, o método SAFER superestimou o ETBHS em 22,89 %.

Os coeficientes da cultura Kc são indicados para região, apresentando valores de 0,4; 0,6; 1,0 e 0,8 para a fase de pegamento, perfilhamento, maturação e colheita, respectivamente.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES JÚNIOR, J.; FOLEGATTI, M.V.; PARSONS, L.R.; BANDARANAYAKE, W.; SILVA, C.R.; SILVA, T.J.A.; CAMPECHE, L.F.S.M. Determination of the crop coefficient for grafted 'Tahiti' lime trees and soil evaporation coefficient of Rhodic Kandudalf clay soil in São Paulo, Brazil. **Irrigation Science**, Berlin, v.25, n.4, p.419-28, 2007.

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

BARBOZA JÚNIOR, C. R. A. **Evapotranspiração da lima-ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tan.) determinada por lisimetria de pesagem**. 2007. 65 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; FOLTRAN, D. E.; HENRIQUE, C. M.; ROSSETO, R. **Absorção de silício, produtividade e incidência de *diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar**. *Bragantia*, Campinas, v. 69, n. 4, p. 937-944, 2010.

CANASAT. *Monitoramento de cana-de-açúcar via imagens de satélite*. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>>. Acesso em: 30 jan. 2016.

CANAPLAN. Agronegócio Brasileiro: Cana-de-Açúcar Visão de curto prazo - Safras 2015/16 a 2017/18. Consultoria Técnica, Piracicaba, 7p. 2015. <http://canaplan.com.br/escopo-detalhado.pdf>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira - cana**, Observatório agrícola, v. 3 - Safra 2016/17, n. 3 - terceiro levantamento, Brasília, p. 1-74, dezembro 2016.

CRUZ, A. C. R.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A.; ROCHA, G. C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa,, v. 29, n. 1, p. 1-10, 2005.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. de A.; AZEVEDO, H. M. de; FRIZZONE, J. A.; ANDRADE J. **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento**. 1. ed. Brasília: EMBRAPA INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA, 2005. 626 p

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.10, n.2, p.283-288, 2006.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas** (Traduzido por GHEYI, H.R.; DAMASCENO, F.A.V.; MEDEIROS, J. F. Campina Grande: FAO, 1994. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Informação Tecnológica, 2009. 628 p.

HENRY, R. J. Basic Information on the sugarcane plant. In: HENRY, R.; KOLE, C. (Ed.). **Genetics, genomics and breeding of sugarcane**. New York: CRC Press, 2010. p. 1-7.

HUMBERT, R. P. **The growing of sugar cane**. Amsterdam: Elsevier, 1968. 779 p.

KOONJAH, S. S.; WALKER, S.; SINGELS, A.; VAN ANTWERPEN, R.; NAYAMUTH, A. R. A quantitative study of water stress effect on sugarcane photosynthesis. **Proceedings...** South African Sugar Technology Association, Pretoria, v. 80, p. 148-158, 2006.

KUIJPER, J. DeGroeï van Bladschijf, Bladscheede em Stengel van het suikerriet. **Arch Suikerind Ned Indië**, v.23, n.1, p.528-556, 1915.

LANDELL, M.G.A.; BRESSIANI, J.A. Melhoramento genético, caracterização e manejo varietal. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A.(Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 101-155.

Ministério da agricultura pecuária e abastecimento. Projeções do agronegócio Brasil 2015/16 a 2025/26. Projeções de Longo Prazo. MAPA/Brasília.104p. 2016.

http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/Proj_Agronegocio2016.pdf

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

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 87 f. Tese (Mestrado em Ciências: Irrigação e Drenagem)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade do Estado de São Paulo, Piracicaba, 2011.

OECD-FAO Agricultural Outlook 2015-2024: Special Feature – Brazil: Prospects and Challenges. Group of Commodity Markets – Working Party on Agricultural Policies and Markets, 26-27 March 2015.

OLIVEIRA, E. C. A.; Freire, F. J.; Oliveira, A. C.; Simões Neto, D. E.; Rocha, A. T.; Carvalho, L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, p.617-625, 2011.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros & Marques Editoração Eletrônica, 2004. 302p.

ROMANI, L. A. S.; GONÇALVES, R. R. do V.; AMARAL, B. F. do; ZULLO JUNIOR, J.; TRAINA JUNIOR, C.; SOUSA, E. P. M. de; TRAINA, A. J. M. Acompanhamento de safras de cana-de-açúcar por meio de técnicas de agrupamento em séries temporais de NDVI. **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.0383.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; HEMINGSSEN, E. A.; BRADSTREET, E.D. Hydrostatic pressure and osmotic potentials in leaves of mangroves and some other plants. **Proceeding of the National Academy of Science**, v. 52, p.119-125, 1964.

SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, J. M. F.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; PEREIRA, R. M. Common bean evapotranspiration estimated by orbital images. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, n.10, p.867-872, 2016.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p.153-156, 2008.

SOUZA, J. M. F. Aplicação do algoritmo SAFER na obtenção da evapotranspiração atual das culturas em condições de Cerrado. Tese de Doutorado – Agronomia / Solo e Água – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. 92p.

SILVA, C. R.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, T. J. A.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, C. F.; RIBEIRO, R. V. Water relations and photosynthesis as criteria for adequate irrigation management in ‘tahiti’ lime trees. **Scientia Agricola**. Piracicaba, v. 62, n. 5, p. 415-422, Sept./Oct. 2005.

SILVA, A. A.; MIZIARA, F. A expansão da fronteira agrícola em Goiás e a localização das usinas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 399-407, 2011.

SILVA, M. D. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. D. L.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, p.241-249, 2014.

SIRCELJ, H.; TAUSZ, M.; GRILL, D.; BATIC, F. Biochemical responses in leaves of two apple tree cultivars subjected to progressing drought. **Journal of Plant Physiology**, v.162, p.1308-1318, 2005.

SILVA, T. J. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, C. R.; ALVES JÚNIOR, J.; BONFIM-SILVA, E.M. Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.392-403.

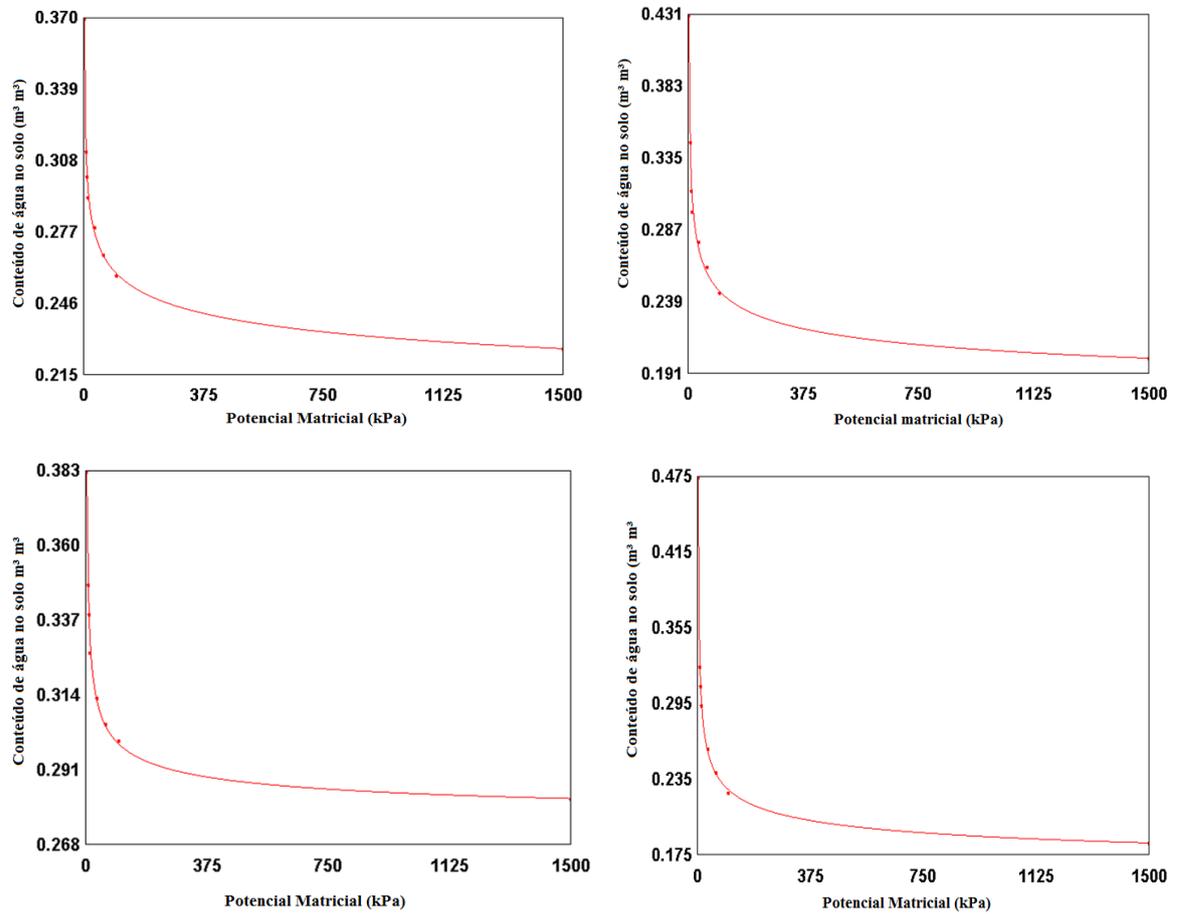
SUGAWARA, L. M., RUDORFF, B. F. T. Sugarcane yield penalization indicator estimated by an agronomic model. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011. Vancouver. **Anais...** Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Institucional**. Ribeirão Preto, 2017. Disponível em:

<<http://www.unica.com.br/noticia/29063662920326811142/moagem-da-safra-2016-por-cento2F2017-do-centro-sul-deve-atingir-entre-605-e-630-milhoes-de-toneladas-de-cana/>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2016.

ANEXOS

Anexo 1. Curva de retenção de água no solo utilizando método da centrífuga nas camadas de 0,0-0,15; 0,15-0,35; 0,35-0,55; 0,55-0,75 m



Anexo 2. Calibração dos sensores EC-5 de acordo com as instruções da fabricante Decagon.



Retirada de amostras indeformadas



Pesagem de solo seco em estufa



Umidecimento lento e uniforme do solo



Acomodação do solo umedecido no amostrador



Vista superficial do sensor EC-5



Pesagem da amostra e leitura da massa umedecida.

Anexo 3. Diferentes fases da cultura da cana-de-açúcar



Instalação do datalogger – Outubro de 2015

Vista superficial do conjunto datalogger e
sensor de chuva – Outubro de 2015



Dezembro - 2015



Janeiro - 2016



Fevereiro - 2016



Abril - 2016



Junho - 2016



Julho - 2016

Anexo 4. Curva de calibração do sensores EC-5

