UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

REGIANE DE CARVALHO BISPO

MEDIÇÕES E MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR NO NOROESTE PAULISTA

Botucatu

2020

REGIANE DE CARVALHO BISPO

MEDIÇÕES E MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR NO NOROESTE PAULISTA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Fernando Braz Tangerino Hernandez

Botucatu

2020

B622m

Bispo, Regiane de Carvalho
Medições e modelagem da evapotranspiração em cana-de-açúcar no Noroeste Paulista / Regiane de Carvalho Bispo. -- Botucatu, 2020
94 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: Fernando Braz Tangerino Hernandez

1. Irrigação. 2. Micrometeorologia. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Evapotranspiração. 5. Cana-de-açúcar. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

"MEDIÇÕES E MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR NO NOROESTE PAULISTA"

AUTORA: REGIANE DE CARVALHO BISPO
ORIENTADOR: FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ
Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE
Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã - UNESP

Prof. Dr. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN
Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. FÁBIO RICARDO MARIN
Engenharia de Biossistemas / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Prof. Dr. ANTÔNIO HERIBERTO DE CASTRO TEIXEIRA
Recursos Hídricos / Universidade Federal de Sergipe

Botucatu, 28 de fevereiro de 2020.

DEDICO

Aos meus pais, **Eunice** e **Alípio**, por todo sacrifício, amor, incentivo e apoio em todas as escolhas da minha vida.
Ao meu irmão **Renato**, pelo apoio, alegria e carinho.
Ao meu avô, **José** (*In memoria*) que nunca entendeu o que eu fazia, mas sempre me recebia com maior sorriso do mundo.
Aos meus familiares pelo o incentivo na realização desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

À FÉ, a todos os Deuses, Deusas, até mesmo ao Universo, já que durante essa jornada muitos amigos e familiares oraram/rezaram/pediram por mim e cada um com sua crença, seria injusto agradecer apenas o Deus que acredito.

Aos meus queridos pais Eunice e Alípio pelo apoio incondicional e por nunca terem me deixado desistir, minha fortaleça são eles e tudo foi e é por eles.

Ao meu querido irmão Renato por sempre ter sido o melhor irmão que eu poderia ter.

Ao Leandro que se fez companheiro em diversos momentos difíceis e que sempre foi meu maior incentivador.

Ao Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez, pela orientação, ensinamentos, paciência e além de orientador sempre foi um amigo que nunca me deixou desistir e sempre acreditou que eu ia chegar onde nem eu imaginava.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia - Irrigação e Drenagem, pela oportunidade.

À Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira, por terem me recebido e sempre ter disponibilizado oportunidade de amadurecer profissionalmente e pessoalmente e aos amigos que aqui fiz, Daniela, Diego, Emanoele, Julia, Larissa, Pedro, Matheus e Vitor.

Ao Daugherty Water for Food Institue (DWFI) na University of Nebraska-Lincoln (UNL), na pessoa do Prof. Dr. Christopher Neale por sua orientação e atenção dedicada durante meu estágio de doutorado no exterior. Ainda ao Dr. Ivo Zution e Prof. Dr. Carlos A. C. dos Santos que além de amigos também me orientaram e repassaram ensinamentos.

Ao Dr. Antônio Heriberto Castro Teixeira, pelas contribuições para realização deste trabalho.

A minha amiga Ângela, que mesmo com toda distância física nunca mudou nossa distância emocional.

Ao meu amigo Kevim (minha Kevima), se tem uma coisa que a gente sabe é como foi e é árdua essa caminhada, o quanto a gente se apoia, o quanto a gente não se permitiu desistir e quando o desejo de largar tudo era maior que nossas forças sempre um teve ao outro. E nem tudo foi tristeza, vivenciamos muitos momentos divertidos e cheios de alegria. Kevima é um presente e esses momentos estão eternizados para sempre.

Aos meus amigos e casal favorito Roberta e Marcello, me acolheram sempre que precisei e nunca passei um dia sem sorrir perto deles, com eles aprendi como podemos crescer junto, como compartilhar a vida e a ser tia da linda Lara.

Aos meus amigos Douglas e Alberto, que sempre foram parceiros nessa jornada onde também em vários momentos difíceis e divertidos nos apoiamos.

A todos os amigos que fiz durante o período que vivi em Botucatu, fui abençoada e tive a oportunidade de conhecer muitas pessoas do bem.

As pessoas que morei e o que cada uma me ensinou, sendo todos que passaram nas Repúblicas Moído e Vaca Véia e ainda a Zildelia com quem dividir apartamento.

Aos amigos que fiz em Ilha Solteira, que fizeram meus dias mais divertidos e caminhada mais leve.

Aos amigos que fiz durante a passagem nos Estados Unidos, principalmente, Rebecca, Nivagma (e família) e Otávio que sempre traziam alegria para meus dias e me davam forças para continuar a jornada.

À RAIZEN e à parte de seus Colaboradores, em especial à Fernando Benvenuti, Francisco Evandro Albino, Leandro Melo e Marcelo Agudo Romão pelo apoio incondicional para a realização desta tese.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida durante o curso e estágio de doutoramento nos Estados Unidos (Processo nº - 88881.189165/2018-01).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro para a construção da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (Processo 2.009/52.467-4) que permitiu a introdução dos estudos que combinam sensoriamento remoto e o conceito de rede de estações agrometeorológicas para estudos da evapotranspiração em escala regional, até então inexistente na região.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro para a aquisição do sistema *Eddy Covariance* (Processo 404.229/2013-1), também inovador na região.

RESUMO

O cultivo da cana-de-açúcar apresenta-se como alternativa sustentável para a produção de energia, como etanol, elétrica e açúcar para consumo humano, sendo o Brasil o maior produtor mundial com o Estado de São Paulo respondendo por 53,6% da área plantada no país. Nesse cenário, o potencial genético máximo da cultura só será atingido com a adequada oferta de água durante todo o ciclo e a grande variabilidade das chuvas faz com que os investimentos em sistemas de irrigação se tornem indispensáveis, fato que vem acontecendo ao longo dos últimos anos. Para o manejo racional da água utilizando a irrigação é necessário o conhecimento de diversos fatores, como a necessidade hídrica da cultura e fatores climáticos, os quais interferem na evapotranspiração da planta e na sua demanda hídrica. Para a estimativa da evapotranspiração uma ferramenta útil é o emprego de técnicas de sensoriamento remoto que podem ser aplicadas a grandes áreas; no entanto, é importante para o manejo adequado da irrigação, estimar a evapotranspiração atual (ETa) diária com base nos diferentes tipos de cultura, cultivares e em escalas de campo. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi validar os algoritmos SAFER e SETMI a partir do sistema correlações turbulentas (*Eddy Covariance*) e estimar adequadamente a ETa e a relação ETa/ETo, bem como o balanço de energia e os seus componentes, no tempo e no espaço. A pesquisa iniciou-se com a análise dos componentes do balanço de energia mensurados pelos métodos das correlações turbulentas e a evapotranspiração, bem como a definição da relação ETa/ETo da cana-de-açúcar, nas condições climáticas da região Noroeste Paulista. Para tanto, densidades de fluxos de calor latente e sensível foram medidas ao longo do ciclo de dois ciclos de produção durante o período de junho de 2016 a junho de 2018. Os resultados obtidos demonstraram que o fechamento do balanço foi superior a 70% para os dois ciclos. A evapotranspiração média diária da cultura variou entre 0,2 a 6 mm dia^{-1}, sendo o requerimento hídrico total de 877 mm para o quarto corte da cana e 943 mm para o quinto corte. Os valores do coeficiente de cultura da cana-de-açúcar para o quarto e quinto corte obtidos foram 0,34 e 0,59 na fase inicial, 0,72 e 0,80 na fase de máximo crescimento, respectivamente, sendo estes valores encontrados inferiores aos informados no Boletim 56 da FAO. Na sequência foi objetivou-se estimar a ETa em áreas de cana-de-açúcar irrigadas, usando uma abordagem de modelagem através do balanço hídrico do solo e balanço de energia. Imagens de infravermelho térmico e multiespectral de sensores de satélite acopladas a conjuntos de dados climáticos, de culturas e de solo foram usadas para estimar a ETa em campos de cana-de-açúcar. O modelo híbrido baseado em sensoriamento remoto chamado *Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface* (SETMI) foi aplicado usando imagens de infravermelho térmico e multiespectral do Landsat. A correlação entre Kcb e o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) foi obtida utilizando fluxos de calor latente medidos com um sistema de *Eddy Covariance*, considerando períodos sem irrigação e chuva durante a estação para evitar a introdução da evaporação do solo no valor de Kcb. O modelo forneceu estimativas de ETa da lavoura, resultados do balanço hídrico do solo e do balanço de energia. A ETa diária e acumulada, o estresse hídrico e as necessidades hídricas estimadas pelo modelo foram comparadas com os dados medidos nos campos experimentais, com os dados obtidos a partir do algoritmo SETMI apresentando forte correlação com o método de *Eddy Covariance*. A relação entre SAVI e Kcb resultou em um R^2 alto (> 80%). Outro método algoritmo foi utilizado nessa pesquisa onde o objetivo foi estimar a evapotranspiração atual da cultura e

coeficientes de cultivo da cana-de-açúcar usando o modelo SAFER e comparar com dados obtidos através do sistema *Eddy Covariance*, a fim de validar e gerar indicadores que sejam base para a prática cada vez mais sustentável da agricultura. Foram utilizadas imagens de satélite acopladas a conjuntos de dados climáticos foram usados para estimar a ETa em áreas de cana-de-açúcar. A ETa estimada a partir do modelo SAFER quando comparado com os dados obtidos pelo o sistema de *Eddy Covariance*, foram subestimados durante todo as duas safras, contudo ainda assim com uma forte correlação entre os resultados obtidos.

Palavras-chave: Micrometeorologicos. Irrigação. Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Sugarcane cultivation presents as a sustainable alternative for the production of energy, such as ethanol, electricity and sugar for human consumption, with Brazil being the largest world producer and the State of São Paulo accounting for 53.6% of the planted area in the country. In this scenario, the maximum genetic potential of the crop will only be achieved with the adequate supply of water throughout the cycle and the great variability of rainfall makes investments in irrigation systems indispensable, a fact that has been happening over the past few years. For the rational water management using irrigation it is necessary to know several factors, such as the crop water requirement and climatic factors, which interfere in the evapotranspiration and in its water demand. To estimate evapotranspiration, a useful tool is use remote sensing techniques that can be applied to large areas; however, it is important for the proper irrigation management, to estimate the actual daily evapotranspiration (ETa) based on the different types of crops, cultivars and on field scales. Therefore, the objective of this work was to validate the SAFER and SETMI algorithms from the Eddy Covariance and to properly estimate the ETa and the ETa/ETo ratio, as well as the energy balance and its components, in time and in space. The research started with the analysis of the energy balance components measured by the methods of turbulent correlations and evapotranspiration, as well as the definition of the sugar cane ETa/ETo ratio, in the climatic conditions of the Northwest region of São Paulo. For this purpose, densities of latent and sensitive heat fluxes were measured over two production cycles from June 2016 to June 2018. The results obtained showed that the balance sheet closing was over 70% for the both cycles. The average daily evapotranspiration of the crop varied between 0.2 to 6 mm day^{-1}, with a total water requirement of 877 mm for the fourth cut of the sugarcane and 943 mm for the fifth cut. The values of the sugarcane crop coefficient for the fourth and fifth cut obtained were 0.34 and 0.59 in the initial phase, 0.72 and 0.80 in the maximum growth phase, and the values found were lower than those reported in FAO Bulletin 56. Then, the objective was to estimate the ETa in irrigated sugarcane areas, using a modeling approach with soil water and energy balance. Thermal and multispectral infrared images from satellite sensors coupled with climate, crop and soil data sets were used to estimate ETa in sugarcane fields. The hybrid model based on remote sensing called Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface (SETMI) was applied using Landsat's thermal and multispectral infrared images. The correlation between Kcb and the soil-adjusted vegetation index (SAVI) was obtained using latent heat flows measured with an Eddy Covariance system, considering periods without irrigation and rain during the season to avoid introducing soil evaporation in the value of Kcb. The model provided estimates of crop ETa, results of soil water balance and energy balance. The daily and accumulated ETa, the water stress and the water needs estimated by the model were compared with the data measured in the experimental fields, with the data obtained from the SETMI algorithm showing a strong correlation with the Eddy Covariance method. The relation between SAVI and Kcb resulted in a high R^2 (> 80%). Another algorithmic method was used in this research where the objective was to estimate the current evapotranspiration of the culture and cultivation coefficients of sugarcane using the SAFER model and compare with data obtained through the Eddy Covariance system, in order to validate and generate indicators that basis the increasingly sustainable practice of agriculture. Satellite images coupled with sets of climatic data were used to estimate ETa in sugarcane areas. The ETa estimated from

the SAFER model when compared with the data obtained by the Eddy Covariance system, were underestimated throughout the two harvests, however still with a strong correlation between the results obtained.

Keywords: Micrometeorologics. Irrigation. Remote sensing.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Procedimento de ajuste do fechamento do balanço de energia do sistema de correlações turbulentas.....49

Tabela 2. Dados de entrada para estimativa do balanço de energia (TSEB) utilizando o SETMI.....52

Tabela 3. Dados de entrada para estimativa do balanço de água no solo (RSWB) utilizando o SETMI.....55

Tabela 1. Procedimento de ajuste do fechamento do balanço de energia do sistema de correlações turbulentas.....75

Tabela 2. Descrição das bandas do Landsat 8, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração para albedo e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).....77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo.....28

Figura 2. Torre de *Eddy Covariance* logo após a colheita.....28

Figura 3. Fechamento do balanço de energia determinado pelo método das correlações turbulentas para a cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. (A) Período de quarto corte, (B) Período de quinto corte. Rn - Saldo de radiação, G - Fluxo de calor no solo, H - Fluxo de calor sensível, λE - Fluxo de calor latente. 32

Figura 4. Densidades de fluxos de energia diários na cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. (A) para o período de quarto corte; (B) para o período de quinto corte determinado pelo método correlações turbulentas. Rn - Saldo de radiação, G - Fluxo de calor no solo, H - Fluxo de calor sensível, λE - Fluxo de calor latente, DAC - Dias após a colheita. 33

Figura 5. Evapotranspiração atual (ETa) e de referência (ETo) ao longo do ciclo da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. (A) para ciclo produtivo no quarto corte; (B) para ciclo produtivo no quinto corte. DAC - Dias após a colheita. 35

Figura 6. Valores médios diários da relação ETa/ETo para a cana-de-açúcar irrigada por gotejamento em subsuperfície. (A) Ciclo produtivo no quarto corte, (B) Ciclo produtivo no quinto corte. 36

Figura 7. Precipitação e Irrigação na cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. (A) Ciclo no quarto corte, (B) Ciclo no quinto corte.....38

Figura 8. Lâminas de entrada (precipitação e irrigação) e saída (ETa) de água em cada fase de desenvolvimento da cultura e total acumulado ao final do ciclo. (A) Ciclo no quarto corte, (B) Ciclo no quinto corte. 39

Figura 1. Localização da área de estudo. (A) área de estudo com localização da Torre *Eddy Covariance*; (B) Área de estudo em composição de cores RGB falsa cor das bandas 5/4/3 do Landsat 8. 47

Figura 2. Resumo do fluxograma com as etapas do modelo SETMI.....56

Figura 3. Comparativo da evapotranspiração atual (ETa) estimada pelo método *Eddy Covariance* (EC), com aquela estimada através do algoritmo SETMI com base no balanço de energia (ETa BE) na cana-de-açúcar. (a) Cana-de-açúcar no quarto corte, (b) Cana-de-açúcar no quinto corte. 58

Figura 4. Correlação entre o coeficiente empírico basal da cultura (Kcb) e o e índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI) para a cultura da cana-de-açúcar.....58

Figura 5. Comparativo da evapotranspiração atual (ETa) obtida pelo método *Eddy Covariance*, com aquela estimada utilizando o algoritmo SETMI com base no modelo híbrido (ETa MH) na cana-de-açúcar. (a) quarto corte, (b) quinto corte.59

Figura 6. Evolução temporal da evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração atual (ETa). estimada utilizando a interface SETMI com base no método híbrido (ETa MH) e com base no balanço de energia (ETa BE). (a) quarto corte, (b) quinto corte. 60

Figura 7. Evolução temporal da precipitação (Prec), irrigação (Irr), capacidade total de água disponível (CAD), água disponível (AD) e Depleção (Dr) na cultura da cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte. 62

Figura 8. Evolução temporal da precipitação (Prec), irrigação (Irr), coeficiente basal da cultura (Kcb), coeficiente de cultura ajustado (Kc adj) e coeficiente basal da cultura com base na refletância (Kcbrf) para a cultura da cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte. 63

Figura 1. Localização da área de estudo. 73

Figura 2. Comparativo dos valores de ET determinada pelo sistema *Eddy Covariance*, com aqueles estimados com aplicação do algoritmo SAFER na cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte. 81

Figura 3. Comparativo dos valores de ETa/ETo obtidos pelo sistema *Eddy Covariance* e estação agrometeorológica, com aqueles modelados com aplicação do algoritmo SAFER na cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte. 81

Figura 4. Evolução da evapotranspiração atual (ETa) obtida pelo sistema *Eddy Covariance*, e aquela estimada com utilização do algoritmo SAFER, juntamente com a evapotranspiração de referência (ETo), precipitação e irrigação na cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte 83

Figura 5. Evolução dos valores de ETa/ETo obtidos *Eddy Covariance* e estação agrometeorógicas, e aqueles modelados pelo algoritmo SAFER, juntamente com precipitação e irrigação na cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte. 85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA: Agência Nacional das Águas

AD: Água disponível

BIO: Biomassa

CAD: Capacidade de água total disponível

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento,

DAC: Dias após a colheita

Dr: Depleção

EC: *Eddy Covariance*

ETo: Evapotranspiração de referência

ETa: Evapotranspiração atual ou real

ETc: Evapotranspiração de cultura

FAO: Food and Agriculture Organization

G: Fluxo de calor no solo

GDac: Graus dias acumulado

H: Fluxo de calor sensível

Irr: Irrigação

IV: Índice de vegetação

Kc: Coeficiente de cultura

Kcb: Coeficiente de cultura basal

Kcbrf: Coeficientes de cultura basal baseados em refletâncias espectrais

Ko: Evaporação da superfície do solo

METRIC: Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration

PA: Produtividade de água

Prec: Precipitação

Ra: Radiação emitida pela atmosfera

RG: Radiação solar global

Rn: Radiação líquida

RR: Radiação solar refletida

Rs: Radiação emitida pela superfície

RSWB: Balanço de água na zona radicular ou balanço hídrico

SAFER: Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving

SAVI: Índice de vegetação ajustado ao solo

SEBAL: Surface Energy Balance Algorithm for Land

SETMI: Spatial Evapotranspiration Modelling Interface

SR: Sensoriamento remoto

SSEBop: Operational Simplified Surface Energy Balance

Ts: Temperatura do solo

TSEB: Two-Source Energy Balance

USGS: United States Geological Survey

λE: Fluxo de calor latente

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....21

CAPÍTULO 1 - BALANÇO DE ENERGIA E ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATRAVÉS DE MEDIÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS EM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO 25

1.1 INTRODUÇÃO 26

1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....27

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....31

1.4 CONCLUSÃO.....39

REFERÊNCIAS.....40

CAPÍTULO 2 - ESTIMATIVA DA EVAPOTRASPIRAÇÃO ATUAL DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR COM APLICAÇÃO DO HÍBRIDO SETMI 44

2.1 INTRODUÇÃO 45

2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....46

2.2.1 Descrição da área de estudo.....46

2.2.2 Método das correlações turbulentas.....48

2.2.3 *Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface* - SETMI.....50

2.2.3.1 Estimativa da ETa baseado no modelo de energia de duas fontes (TSEB) ..50

2.2.3.2 Estimativa da ETa através do balanço de água no solo baseado na reflectância (RSWB).....52

2.2.4 Análise dos Dados.....56

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....57

2.4 CONCLUSÕES 64

REFERÊNCIAS.....64

CAPÍTULO 3 - ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO O ALGORITMO SAFER.....70

3.1 INTRODUÇÃO 71

3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....72

3.2.1 Descrição da área de estudo.....72

3.2.2 Método das correlações turbulentas - *Eddy Covariance* (EC).....73

3.2.3 *Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration* - SAFER 75

3.2.4 Análise dos Dados 79
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 80
3.4 CONCLUSÃO 85
REFERÊNCIAS 86
CONSIDERAÇÕES FINAIS 89
REFERÊNCIAS 91

INTRODUÇÃO GERAL

O cultivo da cana-de-açúcar apresenta-se potencialidade para suplementação de energia, tanto no que se refere à produção de etanol, quanto à produção de energia elétrica proveniente da queima do bagaço nas usinas. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial, sendo o maior destaque para o Estado de São Paulo com aproximadamente 53,6% de área cultivada no país (4,4 milhões de hectares) (CONAB, 2019), sendo o noroeste do estado uma das áreas em expansão comercial da cultura.

Mesmo com sucesso comercial do cultivo da cana-de-açúcar no noroeste paulista, o setor vem sofrendo devido ao alto custo de produção do etanol no Brasil, aliado a fatores climáticos (irregularidades na distribuição das chuvas). A irregularidade das chuvas e a falta de variedades de tolerantes à deficiência hídrica têm sido algumas das principais causas das baixas produtividades na região (LIMA et al., 2009).

Diante destes cenários, a irrigação se sobressai como uma prática agrícola indispensável, no sentido de atender as necessidades hídricas das culturas no momento adequado. Mas, para o manejo racional da irrigação é necessário o conhecimento de diversos fatores, como a necessidade hídrica da cultura para cada estágio fenológico, eficiência do método de irrigação adotado e conhecimento dos fatores climáticos, os quais interferem nas taxas evapotranspiratórias (GONDIM et al., 2005).

A estimativa do uso de água pelas culturas pode ser efetuada com base na evapotranspiração de referência (ETo). A ETo pode ser obtida a partir de uma cultura hipotética, cujas características são semelhantes à evapotranspiração da grama, fazendo com que mantenham-se constantes os parâmetros adotados, sendo eles: altura da planta 0,12 m, cobrindo o solo, com albedo de 0,23 e resistência aerodinâmica de 70 s m^{-1}(ALLEN et al., 1998).

Conhecendo-se a ETo, é possível estimar o consumo de água das culturas com o uso de um fator de correção, denominado coeficiente de cultivo (Kc), assim convertendo o consumo de referência obtido em condições climáticas locais em consumo de hídrico da cultura em seus diferentes estágios fenológicos, obtendo a evapotranspiração de cultura (ETc). A evapotranspiração atual (ETa), é aquela que ocorre quando a cobertura do solo ou cultura em qualquer estádio fenológico, sofre

ou não com estresse hídrico ou outros fatores que possam limitar o seu potencial (ALLEN et al., 1998). Logo, os valores de ETc podem divergir dos valores da ETa, caso ocorra condições desfavoráveis como, ocorrência de pragas ou doenças, salinidade do solo, deficiência ou excesso de água no solo (TEIXEIRA et al., 2009a).

A região noroeste do Estado de São Paulo apresenta a maior taxa de evapotranspiração do Estado (HERNANDEZ et al., 2003) e por essa razão, informações agrometereorológicas são importantes para a prática da irrigação, quando se visa um manejo de água eficiente que proporcione a expansão racional da agricultura irrigada com consequências positivas para toda a região através dos seus efeitos multiplicadores.

Mensurar a evapotranspiração atual (ETa), é essencial para a definição das estratégias de investimentos em sistemas de irrigação, bem como suas operações. Assim, a utilização de dados orbitais e de modelos no balanço de fluxo de energia combinado com dados agrometeorológicas possibilitam a determinação da ETa em diferentes escalas, espaciais e temporais (HERNANDEZ et. al, 2015).

No caso de uso de imagens de satélites, a ETa pode ser obtida com a implementação de algoritmos, como o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) desenvolvido por Bastiaanssen et al. (1998), que tem sido aplicado em muitos países em desenvolvimento, para calcular a evapotranspiração como um resíduo do balanço de energia na superfície, com uso das radiações no visível, infravermelho próximo e termal.

O METRIC (*Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration*), é uma forma otimizada do SEBAL, e foi desenvolvido pela Universidade de Idaho para fornecer um adequado controle dos componentes do balanço de energia (TREZZA, 2005; ALLEN et al., 2007).

O modelo SSEBop (*Operational Simplified Surface Energy Balance*), é utilizado pelo USGS (*United States Geological Survey*) nas estimativas de uso da água pela irrigação nos Estados Unidos, tem sido testado e adaptado pela Agência Nacional das Águas (ANA) para estimativas da ETa em áreas especiais de gestão dos recursos hídricos no Brasil (ANA, 2017).

Outros exemplos são o TSEB (*Two-Source Energy Balance*) (NORMAN et al., 1995), este algoritmo difere, dos citados anteriormente, visto que considera as superfícies do solo e das plantas separadamente. Posteriormente Geli e Neale (2012), desenvolveram um modelo SETMI (*Spatial Evapotranspiration Modelling Interface*),

que é um híbrido do algoritmo TSEB e um modelo de balanço de água (Kcbrf - WB) (CAMPOS et al., 2010), e por fim, o SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) que tem se destacado em trabalhos realizados no Brasil, por apresentar bons resultados em larga escala (TEIXEIRA et al., 2013a).

O SAFER é um algoritmo que estima a ETa tem a vantagem de não utilizar informações de especificação das culturas nem de condições hidrológicas extremas, podendo-se fazer análises de tendências históricas (TEIXEIRA, 2012a). O algoritmo é baseado na equação de Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) e utiliza a taxa de ETa/ETo em conjunto parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, para estimativa da ETa (TEIXEIRA, 2010, 2012b).

Segundo Teixeira et al. (2013a, 2013b), os dados obtidos via satélite nos permitem também estimar a produtividade de água (PA) em larga escala, importante para apoiar o planejamento de políticas agrícolas e tomada de decisão sobre o uso dos recursos naturais. Assim, com produção de biomassa (BIO) e a ETa é possível avaliar a PA em diferentes agros-ecossistemas (TEIXEIRA et al., 2009b).

A determinação da ETa em cultivos agrícolas e em vegetação nativa também tem sido amplamente obtida por meio dos métodos do balanço de energia (BARR et al., 2006; FRANSSEN et al., 2010). Entretanto, estes métodos proporcionam resultados pontuais, não sendo adequados para largas escalas. Nesse sentido, reforça-se o potencial do uso das técnicas de sensoriamento remoto para estimativa dos fluxos de energia e massa no sistema solo-planta-atmosfera. Por outro lado, medições de campo podem ser usadas para validação de algoritmos, melhorando o nível de acurácia das ferramentas baseadas no sensoriamento remoto.

Para validação dos métodos baseados no sensoriamento remoto, torna-se importante o uso de medições de campo com elevada precisão, como é o caso dos lisímetros e dos métodos micrometeorológicos. O uso de lisimetria porém é de difícil aplicação especialmente em plantas de grande porte, devido a necessidade de implantação de mais de um lisímetro para se obter um valor de representativo da ETc. Entre as técnicas micrometeorológicas, que apresentam bastante precisão, permitindo fazer medidas locais, destacam-se os sistemas de covariância de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*), Centilômetros, Razão de Bowen (CARRASCO-BENAVIDES et al., 2012) e o *Surface Renewal* (PAW U et al., 1995, SNYDER et al. 2008, SHAPLAND et al., 2012).

O método da covariância de vórtices turbulentos, também conhecido como método das correlações turbulentas ou dos fluxos turbulentos (*Eddy Covariance*) é uma técnica micrometeorológica que permite obter os fluxos de vapor de água e calor sensível por meio de medidas das flutuações na velocidade vertical do vento, densidade de vapor d'água e temperatura do ar, em alta frequência (SHUTTLEWORTH, 2007; DING et al, 2010). Por esse método, é possível realizar medidas de transferência de energia e massa entre sistemas vegetados terrestres e a atmosfera. Seu uso atualmente é um dos mais aceitos e largamente utilizado para medir fluxos de CO_2, vapor d'água e de calor sensível (KRISHNAN et al., 2012, BURBA, 2013), porém apresenta a dificuldade de fechamento do balanço de energia quando ocorrem situações que prejudiquem o bom funcionamento dos sensores e é uma técnica que exige grandes investimentos, assim, como a cintilômetria.

A Razão de Bowen requer instrumentos mais baratos, porém possui uma desvantagem por medir apenas o fluxo de calor latente, o fluxo de calor sensível é determinando a partir da equação do balanço de energia, sendo assim o fechamento do balanço de energia é forçado, e os coeficientes de transferências turbulentas do vapor de água e do calor são consideradas iguais, o que nem sempre é verdadeiro (STANNARD, 1997; TEIXEIRA e BASTIAANSSEN, 2012). Em relação aos investimentos necessários em cada técnica, Snyder et al. (2008) e Shapland et al. (2012) colocam o método chamado de Surface Renewal como promissor, por exigir sensores mais simples, como os termopares, entretanto exige calibração, mas ainda assim, após simplificações validadas em diferentes regiões da Califórnia levou à essa metodologia ao uso comercial (SHAPLAND, 2014).

Pelo exposto, o uso de técnicas micrometeorológicas são fundamentais em estudos relacionados ao consumo de água pelas culturas e importantes para o aprimoramento dos métodos baseados no sensoriamento remoto, havendo necessidade do aprimoramento de técnicas de manejo da irrigação e conhecimento da necessidade hídrica de novas cultivares que pode ser feito com o apoio dessas novas tecnologias. Assim, o objetivo deste trabalho foi validar os algoritmos SAFER e SETMI a partir da comparação com o sistema de correlações turbulentas (*Eddy Covariance*) e estimar adequadamente a evapotranspiração atual (ETa) e os coeficientes de cultivo atual (ETa/ETo) da cana de açúcar irrigada por gotejamento, bem como avaliar os componentes do balanço de energia, no tempo e no espaço.

CAPÍTULO 1 - BALANÇO DE ENERGIA E ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATRAVÉS DE MEDIÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS EM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi analisar os componentes do balanço de energia obtidos pelos métodos das correlações turbulentas e determinar a evapotranspiração atual (ETa) e sua a razão para a evapotranspiração de referência (ETo) na cultura da cana-de-açúcar, irrigada por gotejamento em subsuperfície, na região Noroeste Paulista. Para tanto, dados micrometeorológicos na cultura e climáticos em sua vizinhança foram monitorados ao longo de dois ciclos de produção de junho de 2016 a junho de 2018. Com os resultados obtidos para o saldo de radiação (Rn); e fluxos de calor latente (λE), sensível (H) e no solo (G), foi verificado o fechamento do balanço foi superior a 70% para os dois ciclos. A ETa média diária da cultura variou entre 0,2 a 6,0 mm dia^{-1} e o consumo hídrico total foi de 877 mm para o quarto corte da cana-de-açúcar e 943 mm para o quinto corte. Os valores da relação ETa/ETo da cana-de-açúcar para o quarto e quinto corte obtidos foram 0,34 e 0,59 na fase inicial, 0,72 e 0,80 na fase de máximo crescimento, respectivamente, sendo estes valores encontrados inferiores aos informados no Boletim FAO 56.

Palavras-chaves: Vórtices turbulentas, calor latente, calor sensível

ABSTRACT: This work aimed to analyze the components of the energy balance obtained by the methods of turbulent correlations and to determine the actual evapotranspiration (ETa) and its ratio to the reference evapotranspiration (ETo) in the sugarcane crop, under subsurface drip irrigation, in the Northwest São Paulo region. To that end, crop micrometeorological data and the climate of the surroundings were monitored over two production cycles from June 2016 to June 2018. With the results obtained for the radiation balance (Rn); and latent heat fluxes (λE), sensitive heat flux (H), and soil heat flux (G), the balance closure was verified to be over 70% for both cycles. The average daily ETa varied between 0.2 to 6.0 mm day^{-1} and the total water consumption was 877 mm for the fourth cut of sugar cane and 943 mm for the fifth cut. The values of the sugar cane ETa/ETo ratio for the fourth and fifth cut obtained were 0.34 and 0.59 in the initial phase, 0.72 and 0.80 in the maximum growth phase, respectively, these values being lower than those reported in FAO Bulletin 56.

Keywords: Eddy covariance, Latent heat, Sensitive heat

1.1 INTRODUÇÃO

Com o cenário de crescimento populacional, a demanda por alimentos e energia tem se tornado um desafio, bem como a importância da diminuição das emissões de gases do efeito estufa e a obtenção de fontes alternativas, limpas e renováveis de energia (TROMBETA E CAIXETA FILHO, 2017). Ainda com às altas constantes nos preços dos derivados do petróleo fica cada vez maior a necessidade de busca por alternativas sustentáveis para atender à demanda por combustíveis, principalmente, por energia, faz com que o setor sucroalcooleiro brasileiro fique cada vez mais competitivo.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com o estado de São Paulo respondendo por 53,6% da produção nacional. Grande parte das usinas paulistas podem escolher no processamento da cana-de-açúcar produzir açúcar ou etanol (CONAB, 2019). Sendo essa uma vantagem competitiva do setor sucroalcooleiro estadual em relação à indústria norte americana, que é baseada no milho. Nos EUA, as usinas precisam produzir etanol a partir de açúcar.

Um dos principais problemas para produção de cana-de-açúcar no noroeste Paulista é irregularidade na distribuição de chuvas. Além dessa irregularidade, existe a falta de variedades tolerantes a deficiência hídrica prolongada, contribuindo para baixas produtividades na região (LIMA et al., 2009). Deste modo, a irrigação se torna uma prática indispensável durante o ciclo da cultura, sendo imprescindível os sistemas de irrigação mais eficientes, como o de gotejamento (PARKES et al., 2010; BOAS et al., 2011; MARTINS et al., 2011). Por estas razões, a expansão das áreas irrigadas de cana-de-açúcar na região noroeste Paulista tem se dado com o sistema de irrigação por gotejamento em subsuperfície.

Outra prática imprescindível é o conhecimento sobre as necessidades hídricas e o momento adequado de realizar a reposição de água, mas para isso, é fundamental a utilização de métodos para a determinação da evapotranspiração atual (ETa), nos diferentes estágios da cultura.

Em áreas irrigadas, a estimativa da evapotranspiração das culturas (ETc), que é considerada quando não há nenhum tipo de restrição, é feita em função da evapotranspiração de referência (ETo) multiplicada pelo coeficiente de cultura (Kc) correspondente à cada fase fenológica, enquanto que a evapotranspiração real ou atual (ETa) pode ser obtida pela partição da energia disponível, radiação líquida

subtraído pelo fluxo de calor no solo (Rn-G) entre calor sensível (H) e calor latente (λE), utilizando os métodos do balanço de energia como, por exemplo, o das correlações turbulentas ou "*Eddy Covariance"* (EC) (CARMO et al., 2017).

O método das correlações turbulentas é uma técnica micrometeorológica que permite obter λE e H por meio de medidas, das flutuações na velocidade do vento, densidade de vapor d'água e temperatura do ar, em alta frequência, isso em uma grande variedade de sistemas ecológicos e em áreas de cultivo (SHUTTLEWORTH, 2007; DING et al, 2010). Por esse método, é possível realizar medidas de transferência de energia e massa entre superfície vegetada e a baixa atmosfera. Seu uso atualmente é um dos mais aceitos e largamente utilizado para medir fluxos de CO_2, vapor d'água e fluxo de calor sensível (KRISHNAN et al., 2012).

Desta forma, objetivou-se analisar os componentes do balanço de energia mensurados pelos métodos das correlações turbulentas e a ETa, bem como definir a relação ETa/ETo da cana-de-açúcar como indicador de umidade na zona das raízes, nas condições ambientais da região Noroeste Paulista.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida em um campo de produção de cana-de-açúcar uma área comercial no município de Andradina, São Paulo (20° 43' 43,6" Sul, longitude 51º 16' 30,3" Oeste, 360 m) (Figura 1). O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen (1936), é do tipo tropical com inverno seco (Aw), com precipitação anual média 1242 mm, evapotranspiração de referência média anual 1536 mm, radiação solar média de 17,2 MJ m^{-2} dia^{-1}, temperatura do ar entre de 19,7 a 26,9ºC e umidade relativa média de 62,4% (UNESP, 2019).

O campo de produção de cana-de-açúcar selecionado para instalação deste estudo compreendeu uma área de 23,2 hectares, cultivado com a variedade RB96 - 6928, em Latossolo Vermelho Distrófico Típico, irrigada por gotejamento subsuperficial, com gotejadores enterrados a 0,40 m da superfície do solo. O estudo foi realizado para dois o ciclo de cana-soca (4 e 5 cortes), que compreendeu o período de 27 de junho de 2016 a 28 de junho de 2018.

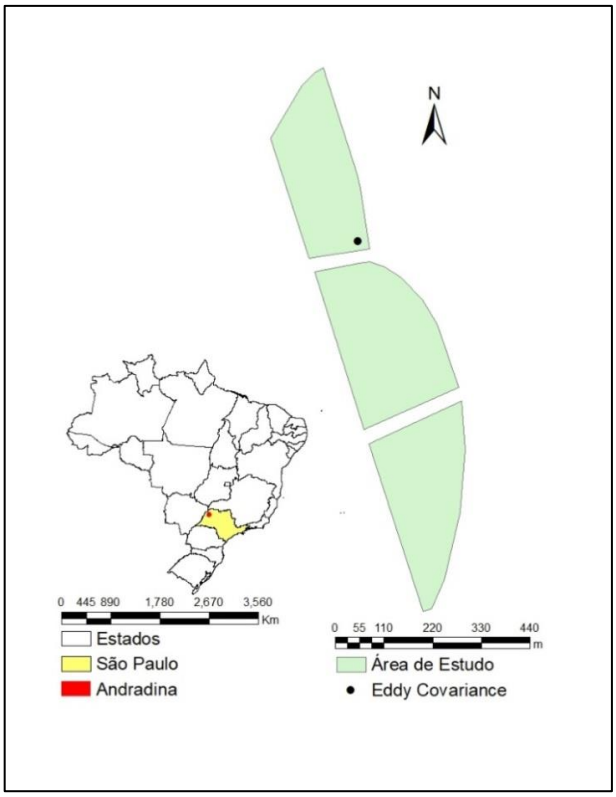

Figura 1. Localização da área de estudo.

Foi instalada uma torre equipada com sensores para medir os parâmetros micrometeorológicos e os componentes do balanço de energia, com medidas em baixa e alta frequência, respectivamente. Os fluxos de calor latente (λE) e sensível (H) foram obtidos pelo sistema das correlações turbulentas - *Eddy Covariance* (EC) (Figura 2.).

Figura 2. Torre de *Eddy Covariance* logo após a colheita.

O balanço de energia simplificado no sistema solo-planta-atmosfera é constituído pelo saldo de radiação (Rn), λE, H e do fluxo de calor no solo (G), todos expressos em W m^{-2} ou MJ m^{-2} dia^{-1}:

$$Rn = \lambda E + H + G \quad (01)$$

Com relação aos dados de alta frequência, H obtido com um anemômetro sônico tridimensional, enquanto que λE por um analisador de gás conjugados no equipamento IRGASON (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA), posicionado considerando a direção do vento predominante, com um registrador de dados (CR3000, Campbell Scientific Instruments, Utah, EUA) para armazenar dados brutos a 10 Hz (10 dados por segundo) de medidas a 8,0 m de altura.

O fluxo de calor latente (λE) e fluxo de calor sensível (H) foram obtidos pelas seguintes equações (Aubinet et al., 2012; Burba, 2013):

$$\lambda \mathrm{E} = \rho\lambda\, \overline{\mathrm{w'q'}} \quad (02)$$

$$\mathrm{H} = \rho c_p\, \overline{\mathrm{w'T'}} \quad (03)$$

Em que ρ é a densidade do ar seco (kg m^{-3}), w é a velocidade vertical do vento (m), λE é o fluxo de calor latente (W m^{-2}), λ é o calor latente de vaporização da água (J kg^{-1}), q é a razão de mistura do vapor de água (kg m^{-3}), H é o fluxo de calor sensível (W m^{-2}), cp é o calor específico do ar (J kg^{-1} K^{-1}) e T é a temperatura do ar (°C).

As variáveis micrometeorológicas de baixa frequência que foram medidas acima do dossel: saldo de radiação - Rn resultante de medições de todos os componentes do balanço de energia separadamente, sendo RG - radiação solar global, RR -radiação solar refletida, Ra - radiação emitida pela atmosfera, Rs - radiação emitida pela superfície (CNR4, Net Radiometer – Kipp & Zonen B.V., Delft, Holanda) e precipitação (CS700-L, Hydrological Services Pty. Ltd., Sidney, Austrália), esses sensores foram fixados 5,0 m de altura. No solo foram instalados fluximetros para mensurar o fluxo de calor no solo (HFP01-L, Campbell Scientific, Inc. Logan, Utah, EUA), sensor de temperatura do solo (107, temperature probe, Campbell Scientific, Inc. Logan, Utah, EUA) colocados a 0,40 m. Os dados de baixa frequência

foram coletados continuamente em intervalos de 5 segundos com médias ou totalizações de 30 min e 1 hora, armazenados em um registrador de dados (CR23X, Campbell Scientific Instruments, Utah, EUA).

Os dados brutos do sistema EC (10 Hz) foram processados utilizando software *Eddy Pro Advanced* (V 3.0 e 4.0 - LI-COR, Lincoln, NE, EUA). Foi utilizado a configuração padrão do software para verificações de séries temporais (VICKERS e MAHRT, 1997), filtros de baixa e alta frequência (MONCRIEFF et al., 1997, 2004), flutuações de densidade (WEBB et al., 1980), correção de inclinação do anemômetro com rotação dupla (WILCZAK et al., 2001), filtros de baixa e alta frequência (MONCRIEFF et al., 1997, 2004), minimização do atraso usando covariância máxima com padrão defasagem de zero e cálculo da detecção do limiar (u*) usando ambos ao longo e cisalhamento transversal do vento.

O *Footprint* foi calculado seguindo Kljun et al. (2004) e bandeiras de qualidade determinadas por Mauder e Foken (2004). Todos os dados brutos foram processados gerando médias de 30 minutos. Para o preenchimento de falhas e particionamento de fluxo foi utilizado o software TOVI (V 3.0 e 4.0 - LI-COR, Lincoln, NE, EUA).

Para converter os valores do fluxo, que representa a energia por unidade de área e por unidade de tempo, em unidade de lâmina evaporada e, ou, transpirada em um dado intervalo de tempo, ou seja, a ETa foi utilizada a seguinte equação descrita por (AUBINET et al., 2012):

$$ETa = 1800 \frac{\lambda \mathrm{E}}{10^3 (3147.5 - 2.37 Tair)} \quad (04)$$

Em que ETa é evapotranspiração atual (mm 30-min^{-1}), λE é o fluxo de calor latente (W m^{-2}), 1800 é o fator de conversão para segundos (1800 segundos), (3147.5 - 2.37Tair) é calor latente de vaporização de água (J kg^{-1}), e Tair é temperatura do ar (K). Posteriormente, foi realizada a integração destes valores para obtenção valores diários da cultura (mm dia^{-1}), fazendo a somatório dos valores de ETa.

O consumo hídrico para todo o ciclo da cultura foi calculado pela soma dos valores diários de ETa obtidos no período de monitoramento, correspondente a cada fase fenológica da cana-de-açúcar, divididas como: Fase I (F1 - brotação e perfilhamento), Fase II (F2 - estabelecimento e perfilhamento), Fase III (F3 -

crescimento máximo) e Fase IV (F4 - Maturação fisiológica), a partir dos dias após a colheita (DAC) quando inicia o novo ciclo.

Os dados de evapotranspiração de referência (ETo) e demais variáveis meteorológicas foram obtidos através da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (http://clima.feis.unesp.br) operada pela Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira, sendo essa localizada em Itapura. Para o cálculo da ETo, utilizou-se o método de Penman Monteith padronizado pela FAO (ALLEN et al., 1998):

$$\mathrm{ETo} = \frac{0{,}408\ \Delta(\mathrm{R_n} - \mathrm{G}) + \gamma \frac{900}{\mathrm{T}+273}\mathrm{U_2}\ (\mathrm{e_s} - \mathrm{e_a})}{\Delta + \gamma(1+0{,}34\ \mathrm{U_2})} \quad (05)$$

Em que ETo é evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}), Rn é radiação líquida (MJ m^{-2} dia^{-1}), G é o fluxo de calor no solo (MJ m^{-2} dia^{-1}), T é a temperatura média do ar a 2 m de altura (°C), U_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}), e_s é a pressão do vapor de saturação (kPa), e_a é pressão real do vapor (kPa), e_s - e_a é o déficit da pressão de vapor (kPa), Δ é declive da curva da saturação do vapor (kPa $°C^{-1}$) e γ é a constante psicrométrica (kPa $°C^{-1}$). Com base na razão entre os valores de ETa e ETo foi determinado ETa/ETo, sendo este adimensional.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fechamento do balanço de energia durante o período de estudo foi realizado em escala diária (Figuras 3A e 3B). A correlação entre a energia disponível (Rn - G) para evapotranspiração e aquecimento do ar (λE + H) foi de 71% para a cana-de-açúcar no quarto corte e 82% para cana-de-açúcar no quinto corte. Corroborando, com resultados em trabalhos realizados em vários tipos de superfícies que apresentaram valores desta relação entre 70-90% (BLANKEN et al. 1998; AUBINET et al. 2000; TWINE et al. 2000; WILSON et al. ,2002; BARR et al. 2006).

Quando comparados os resultados do fechamento do balanço de energia nas duas safras (Figura 3A e 3B), observa-se que a melhor correlação ocorreu no quinto corte, uma das causas pode ser devido ao quarto corte ter ocorrido um maior número de perdas de dados assim ocasionando uma defasagem e também valores mais elevados de energia disponível.

Quando se trabalha com o método de correlações turbulentas, a avaliação do fechamento do balanço de energia é imprescindível devido as subestimativas de λE+H em relação Rn-G. Pesquisas realizadas por Li et al. (2005), encontraram valores baixos para o fechamento de energia durante o inverno em experimentos realizados na China. Portanto, correções são importantes quando há ocorrência de chuva e para variação da direção do vento. Quando os efeitos destes erros são corrigidos, a energia armazenada no dossel das plantas, considerando que a cana-de-açúcar apresenta alta densidade de colmos e de folhas, pode resultar como fonte de erro para o não fechamento entre os fluxos de energia obtidos e a energia disponível.

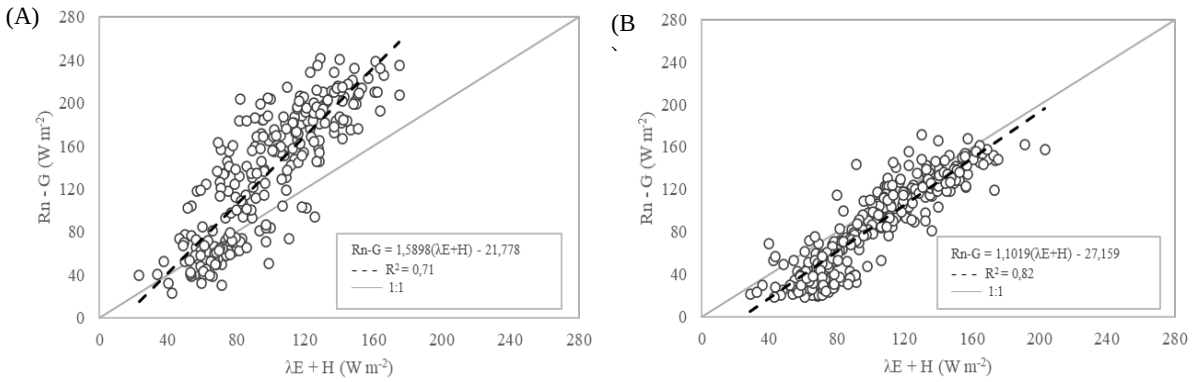

Figura 3. Fechamento do balanço de energia determinado pelo método das correlações turbulentas para a cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. (A) Período de quarto corte, (B) Período de quinto corte. Rn - Saldo de radiação, G - Fluxo de calor no solo, H - Fluxo de calor sensível, λE - Fluxo de calor latente.

Na Figuras 4A e 4B estão apresentadas as densidades de fluxos determinadas para os dois cortes da cana-de-açúcar. Verificou-se que o comportamento dos fluxos para as duas safras foi similar para cada fase fenológica. Na Fase F3 os valores de λE são superiores, isso devido ter apresentado maior consumo hídrico durante o ciclo da cultura. Segundo Inman-Bamber (2004), a máxima necessidade hídrica ocorre durante a fase de crescimento máximo (F3). Contudo, o consumo hídrico diário da cultura tem variação dependendo da variedade, pois além do estágio fenológico, este também depende da demanda atmosférica.

Ainda na Figura 4A e 4B, observa-se que nas fases inicial e final da cultura Rn decresce e em alguns momentos que o H é igual ou até mesmo superior ao λE. Isso deve-se ao baixo índice de área foliar no início do ciclo e a presença de palhada cobrindo o solo. Comportamento semelhante foi observado por Silva et al. (2019), que em estudo com cultivo de cana-de-açúcar com palhada, constataram que a presença

de palhada remanescente, aumentou os valores do albedo da superfície, reduzindo a energia disponível no ambiente (Rn-G) proporcionando a diminuição significativa do fluxo de calor latente (λE) e aumento do fluxo de calor sensível (H) no cultivo.

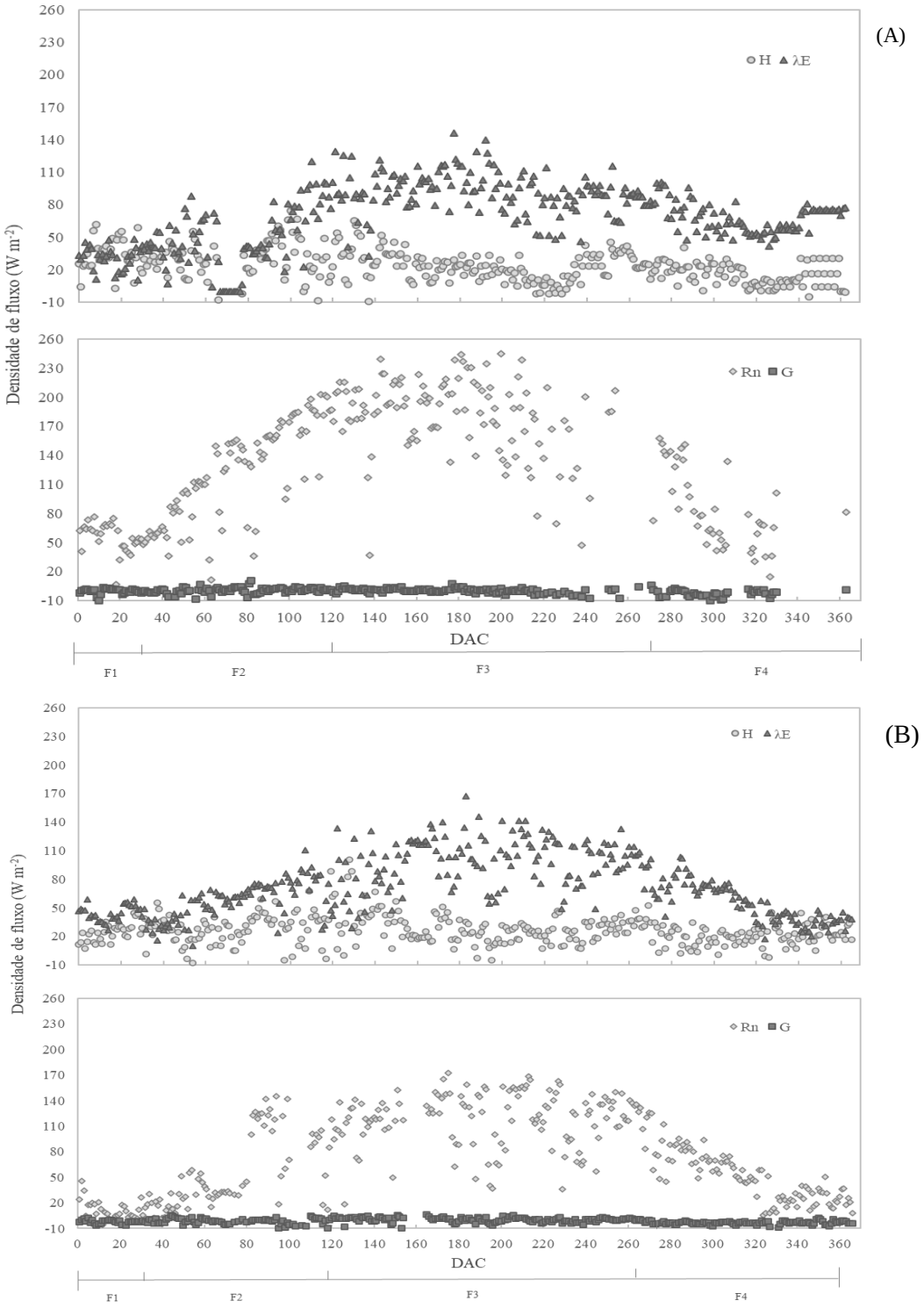

Figura 4. Densidades de fluxos de energia diários na cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. (A) para o período de quarto corte; (B) para o período de quinto corte determinado pelo método correlações turbulentas. Rn - Saldo de radiação, G - Fluxo de calor no solo, H - Fluxo de calor sensível, λE - Fluxo de calor latente, DAC - Dias após a colheita.

Na fase final do ciclo da cultura (Figura 4A e 4B), a igualdade e superioridade do H sobre o λE, foi ocasionada além do efeito da palhada sobre o solo, a prática da suspensão da irrigação, que causa impacto sobre a ETa. Carmo et al. (2017), em estudo realizado no Vale do São Francisco observaram que na fase de maturação (F4), elevaram-se os valores de H, para os autores isso pode ser decorrente de menor quantidade de água de irrigação, bem como da redução do índice de área foliar decorrente do tombamento.

As Figuras 5A e 5B mostram as variações das evapotranspirações atual (ETa) e de referência (ETo), em escala diária, para a cana-de-açúcar ao longo dos dois ciclos de cultivo. Os valores de ETa para o quarto corte variou de 0,2 a 5,2 mm dia $^{-1}$ e para o quinto corte estes estiveram entre 0,4 e 6,0 mm dia $^{-1}$, as menores taxas ocorreram nos primeiros dias após a colheita (DAC) onde o solo encontra-se coberto por palhada, sendo assim a energia responsável pela evaporação inferior. Carmo et al. (2017), em pesquisa realizada com cana-de-açúcar utilizando o sistema de correlações turbulentas encontraram valores de ETa variando entre 1,2 e 7,1 mm dia^{-1}. Segundo Bernardo (2006) a demanda hídrica da cana-de-açúcar varia entre 2,0 e 6,0 mm dia^{-1}, porém fatores climáticos, ambientais e fisiológicos são determinantes na mudança desses valores.

Ainda nas Figuras 5A e 5B, a fase F4 é caracterizada pela suspensão da irrigação para condicionar a maturação fisiológica da cultura, o que implica em uma redução nos valores de ETa, que oscilaram entre 1,9 e 2,4 mm dia^{-1} em média para os dois ciclos avaliados. A importância na diminuição no teor de água no solo é explicada por Ramesh e Mahadevaswamy (2000), que evidenciaram que nesta fase ocorre o maior acúmulo de sacarose nos colmos. Sendo assim o ideal é que a umidade na zona das raízes seja reduzida nesta fase, para indução de estresse hídrico (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005).

Para a relação ETa/ETo que é um indicador de umidade na zona das raízes, para cada fase do ciclo da cana-de-açúcar (Figuras 6A e 6B), foi observado que no quarto corte os valores foram F1 0,34; F2 0,45; F3 0,72; 0,78 e para o quinto corte os valores médios foram F1 0,59; F2 0,46; F3 0,80 e F4 0,62, valores baixos indicam condições de estresse hídrico. Estes valores encontrados, por sua vez, são inferiores aos informados no boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998). Entretanto, segundo Avilez et al. (2018), em trabalho avaliando a necessidade hídrica da cana-de-açúcar no mesmo local deste estudo, constataram que o projeto de irrigação foi

subdimensionado deixando a cultura sujeita a estresse hídrico durante seu ciclo. Carmo et al. (2017), encontraram valores de ETa/ETo variando entre 0,31 e 1,70, apresentando média de 0,83±0,24. Já Watanabe et al. (2004) em pesquisa realizada em região semiárida da Tailândia, encontraram um valor médio de 1,10 para a fase de máximo crescimento da cana-de-açúcar.

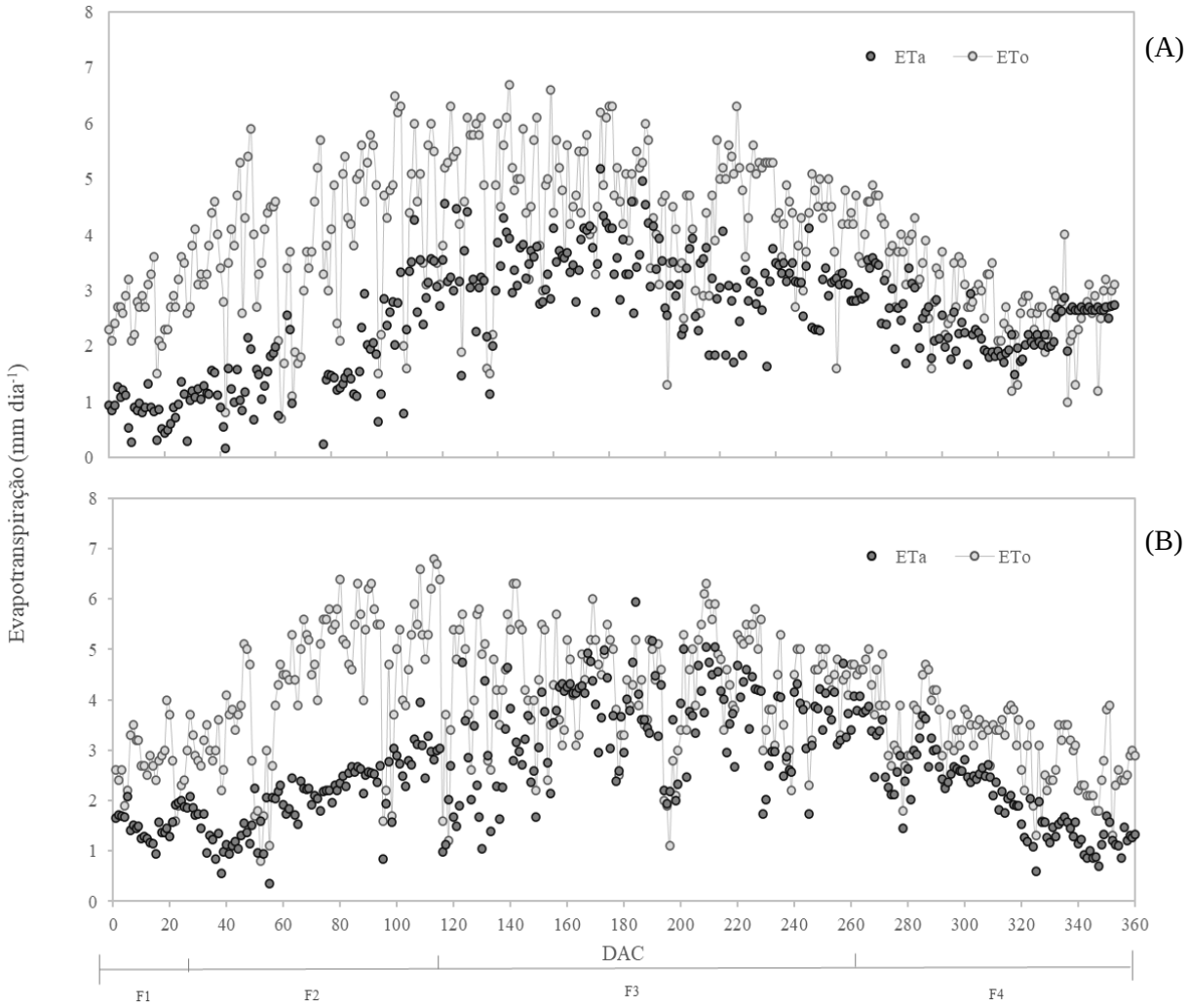

Figura 5. Evapotranspiração atual (ETa) e de referência (ETo) ao longo do ciclo da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. (A) para ciclo produtivo no quarto corte; (B) para ciclo produtivo no quinto corte. DAC - Dias após a colheita.

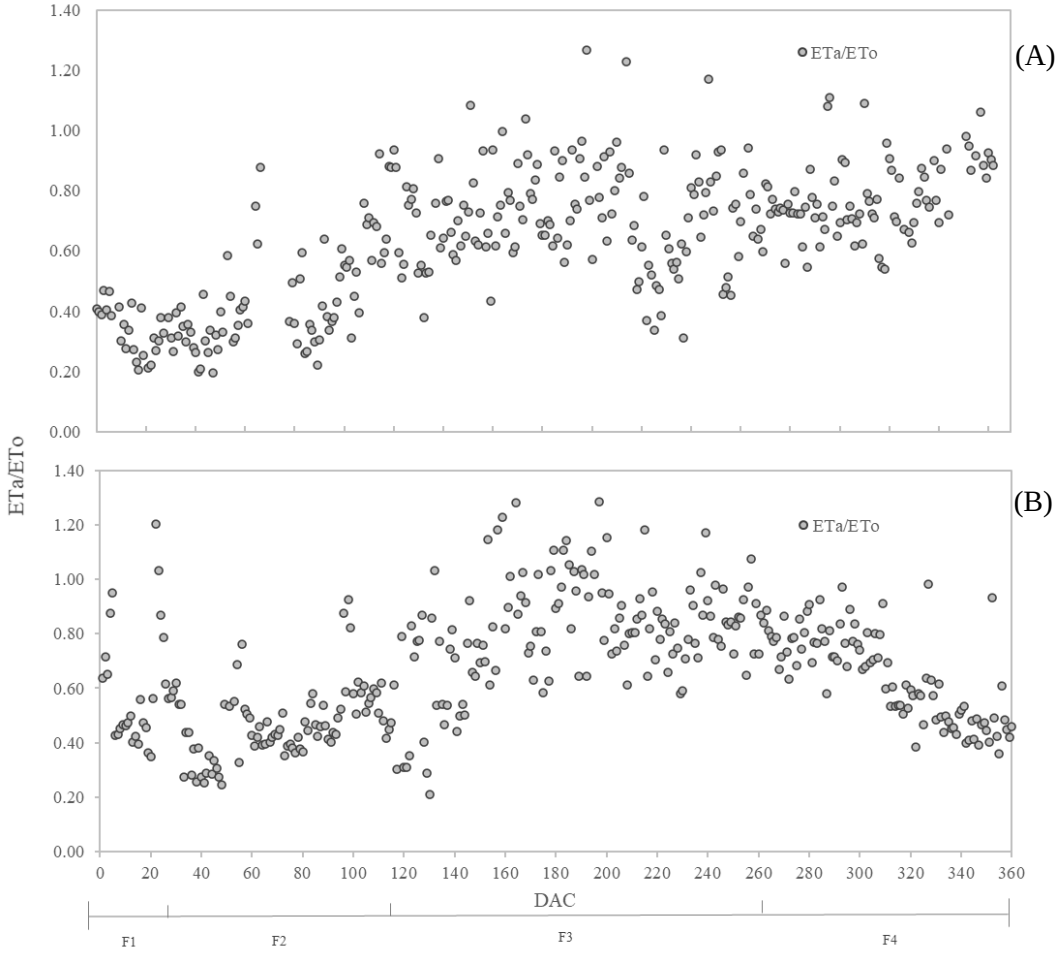

Figura 6. Valores médios diários da relação ETa/ETo para a cana-de-açúcar irrigada por gotejamento em subsuperfície. (A) Ciclo produtivo no quarto corte, (B) Ciclo produtivo no quinto corte.

É importante enfatizar que os valores da razão ETa/ETo sendo um indicador de umidade na zona das raízes, baixos valores significam condições de estresse hídrico, enquanto só serão considerados coeficiente de cultura (Kc) com valores elevados, consequentemente quando a planta não é submetida a restrição hídrica.

Nassif, Marin e Costa (2014) utilizando o método de Razão de Bowen, encontraram valores da relação ETa/ETo variando entre 0,9 e 1,1 para cana-de-açúcar em Piracicaba, no estado de São Paulo. Ainda de acordo com Marin et al., (2019), em estudo com diversas culturas incluindo cana-de-açúcar, o ETa/ETo diminuiu com o aumento dos valores de ETo, mesmo com altos índices de água no solo. Para os autores, o declínio nesta relação ocorre para todas as culturas em ambientes de alta demanda evaporativa (representando altos valores de ETo).

Diante disto e sabendo-se que na região noroeste do estado de São Paulo, têm-se as mais altas taxas de evapotranspiração do Estado, com o balanço hídrico mostrando-se negativo (em déficit) em até 8 meses do ano, pode ser um indicativo

dos valores da relação ETa/ETo encontrados nesse estudo estarem abaixo dos valores preconizados na literatura, acrescido do fato de que o sistema de irrigação ter capacidade de entregar apenas 3,0 mm/dia, que representa a possibilidade de atender a demanda evapotranspirativa da cultura em apenas 30% dos dias do ano, ficando na dependência das chuvas para manter o armazenamento de água no solo em níveis adequados à produtividade potencial conforme mostra Avilez et al. (2018).

De fato, mesmo considerando a redução da ETa em função dos baixos níveis de umidade no solo, nas duas safras consideradas, em 61% e 67% dos dias as taxas foram iguais ou inferiores à capacidade de irrigação do sistema, na quarta e quinta safra, respectivamente, ainda assim os números, corroboram com Avilez et al. (2018), mesmo em condições de menor armazenamento de água no solo, ou seja, o investimento feito, ainda que tenha apresentado resultados tidos como satisfatórios aos investidores, está aquém do que poderia proporcionar em termos de produtividade e consequentemente, de lucratividade, se comparada às condições de sequeiro. Se ainda a análise financeira for feita considerando o custo da “não irrigação”, ou seja, considerando a diferença entre a produtividade prevista de sequeiro no regime histórico de chuvas e aquela obtida nos anos de interesse, a diferença na lucratividade do negócio é ainda ampliada.

A capacidade de um sistema de irrigação é uma questão sensível, especialmente em grandes áreas irrigadas como é o caso da cana, pois opõe investimentos contra custeio, ou custo operacional. Sistemas subdimensionados, instalados à investimentos menores, não permitem a produtividade máxima, porém mantém as plantas em melhores condições do que tendo sido observado em condições de sequeiro, quando morte prematura de plantas pode ocorrer pelo déficit hídrico.

Nas Figuras 7A e 7B, são apresentados os valores de precipitação e irrigação durante os ciclos nos períodos de quarto e quinto, cortes da cana-de-açúcar. Pode-se observar no quarto corte, a última fase (F4) revelou-se com o maior volume de chuva quando comparado com o quinto corte, esse pode ser um dos fatores que influenciaram no aumento do valor da relação ETa/ETo no final do ciclo no quarto corte (Figura 6A), já que com a entrada de água no sistema solo-planta-atmosfera a taxa evapotranspirativa aumenta e com a ETa maior e pouca variação da ETo, consequentemente ocorre a elevação da relação ETa/ETo.

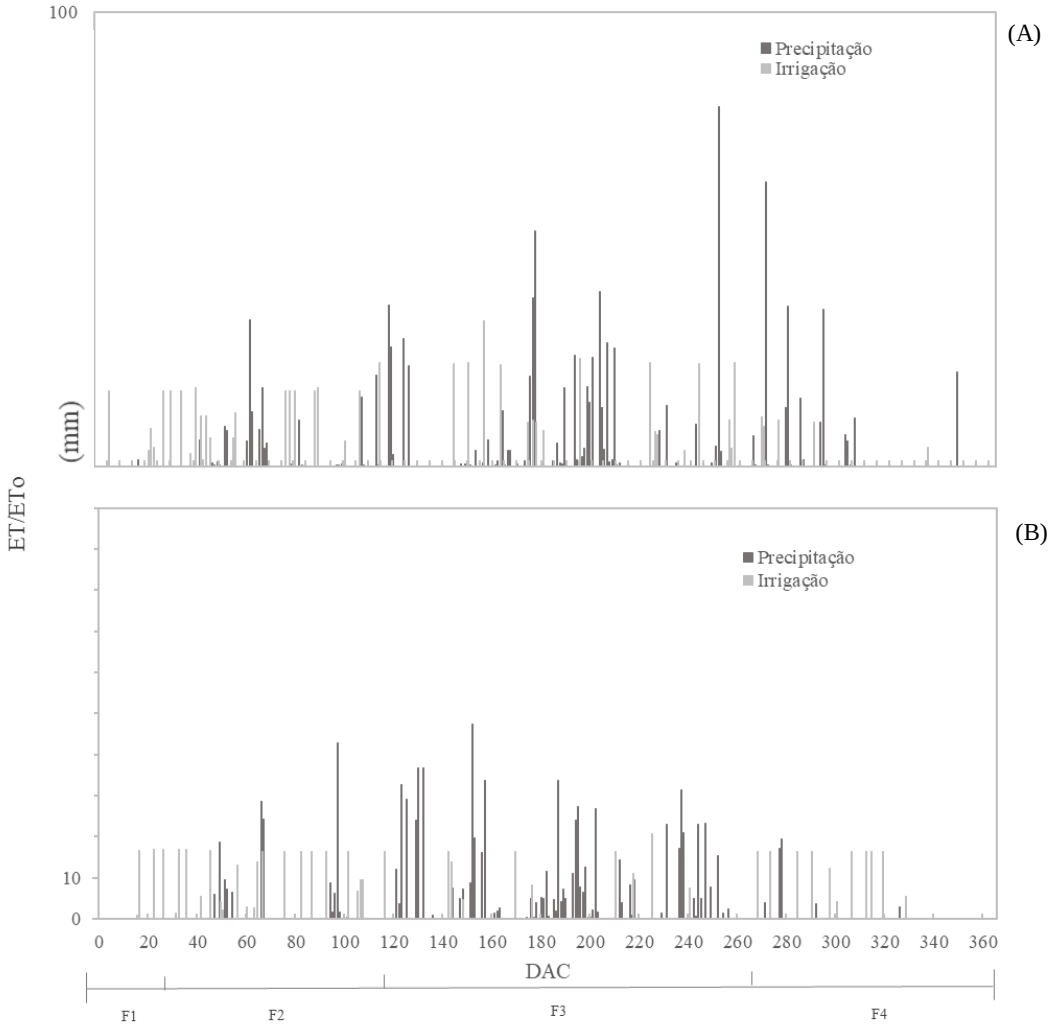

Figura 7. Precipitação e Irrigação na cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. (A) Ciclo no quarto corte, (B) Ciclo no quinto corte.

Analisando as Figuras 8A e 8B, observa-se que os valores de precipitação juntamente com a irrigação são superiores a ETa em todas as fases, contudo deve-se levar em consideração a irregularidade na distribuição de chuvas e a capacidade de armazenamento de água no solo, já que chuvas volumosas não é possível o aproveitamento total pelas plantas. Na fase F3, a de maior consumo hídrico, se analisarmos apenas a irrigação nota-se que a água aplicada é inferior a ETa nas duas safras.

Um fator importante a ser considerado é que anualmente a região Noroeste do estado de São Paulo conta com uma ETo média de 1.446 mm e precipitação de 1.280 mm, com ao menos seis meses de déficit hídrico, sendo agosto o mês historicamente mais crítico (SILVA JUNIOR et al., 2018), sendo desta forma fundamental investimentos em sistemas de irrigação para que não ocorra perda de produtividade

das culturas na região. Contudo, para um planejamento correto é necessário analisar fatores climáticos e ambientais da área de estudo para garantir o desenvolvimento, qualidade e produtividade, bem como tomar decisão se a irrigação deverá ser realizada durante todo o ciclo repondo o consumo hídrico da cultura.

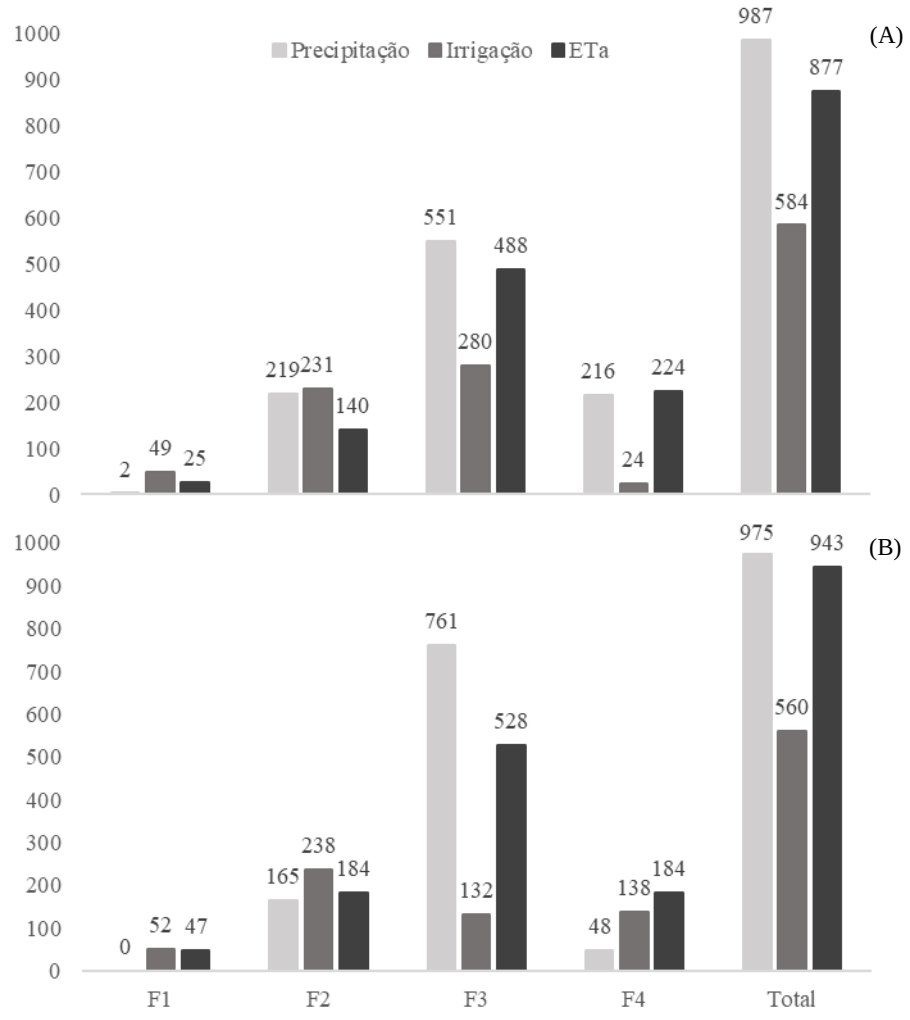

Figura 8. Lâminas de entrada (precipitação e irrigação) e saída (ETa) de água em cada fase de desenvolvimento da cultura e total acumulado ao final do ciclo. (A) Ciclo no quarto corte, (B) Ciclo no quinto corte.

1.4 CONCLUSÃO

O fechamento do balanço de energia apresentou dados consistentes quando comparados com a literatura, entretanto os valores de evapotranspiração e da relação

ETa/ETo encontrados a partir das correlações turbulentas foram inferiores aos preconizados na literatura para cultura da cana-de-açúcar.

Faz-se necessário mais estudos, especialmente em condições ótimas de armazenamento de água no solo, relacionado o balanço de energia e demanda hídrica da cultura.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, Italy, p. 297, 1998.

AUBINET, M.; GRELLE, A.; IBROM, A.; RANNIK, U.; MONCRIEFF, J.; FOKEN, T.; KOWALSKI, A. S.; MARTIN, P. H; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.;CLEMENT, R.; ELBERS, J.; GRANIER, A.; GRÜNWALD, T.; MORGENSTERN, K.; PILEGAARD, K.; REBMANN, C.; SNIJDERS, W.; VALENTINI, R.; VESALA, T. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. **Advances in Ecological Research**, [S.L.], v. 30, [S.N.], p. 113-176, 2000.

AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPALE, D. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis: **Springer Science & Business Media**, 2012. 438 p.

AVILEZ, A. M. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; GIOVANELLI, L. B. Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial 30 anos PG Irriga, v.1, n.1, p.171-188, 2018.

BARR, A. G; MORGENSTERN, K.; BLACK, T. A.; MCCAUGHEY, J. H. Surface energy balance closure by the eddy covariance method above three boreal forest stands and implications for the measurement of the CO2 flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 140, [S.N.], p. 322-337, 2006.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. 8 a ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T; TEIXEIRA, A. H. C. Balanço hídrico e estimativa do consumo relativo de água da cultura da cana-de-açúcar na região noroeste paulista. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, IRRIGA & INOVAGRI, v. 1, n. 1, p. 94-101, 2017.

BLANKEN, P. D.; BLACK T. A.; NEUMANN H. H; DEN HARTOG, G.; YANG, P. C.; NESIC, Z.; STAEBLER, R.; CHEN, W, NOVAK, M. D. Turbulent flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest. **Boundary Layer Meteorology,** Toronto**,** v. 89, [S.N.], p.109-140,1998.

BOAS, R. C. V.; PEREIRA, G. M.; REIS, R. P.; LIMA JÚNIOR, J. A.; CONSONI, R. Viabilidade econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cebola. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, [S.N.], p. 781-788, 2011.

CARMO, J. F. A.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; LEITÃO, M. M. V. B. R. Balanço de energia e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar por dois métodos micrometeorológicos. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n.1, p.101-111, 2017.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: Cana-de-açúcar. Safra 2018/2019. Terceiro levantamento, Brasília, p. 1-65, março 2019.

DING, R.; KANG, S.; LI, F.; ZHANGA, Y.; TONGA L.; SUN, Q. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, [S.N.], p. 87-95, 2010.

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

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

LI, Z.; YU, G. R.; WEN, X. F.; ZHANG, L. M.; REN, C. Y.; FU, Y. L. Energy balance closure at ChinaFLUX sites**. Science in China** Series D - Earth Sciences, [S.L.], v. 48, [S.N.], p. 51-52, 2005.

KLJUN, N.; ROTACH, M. W.; CALANCA, P. A Simple Parameterisation for Flux Footprint Predictions, Bound-Lay. **Meteorology**, [S.L.] v. 112, [S.N.], p. 503-523, 2004.

KRISHNAN, P.; MEYERS, T. P.; SCOTT, R. L.; KENNEDYC, L.; HEUER, M. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semiarid grasslands in North America. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 153, [S.N.], p. 31-44, 2012.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; NASSIF, D. S. P.; VIANNA, M. S.; PILAU, F. G.; SILVA, E. H. F. M.; SOBENKO, L. R.; GONÇALVES, A. O.; PEREIRA, R. A. A.; KASSIO, S. C. Revisiting the crop coefficient-reference evapotranspiration procedure for improving irrigation management. **Theoretical and Applied Climatology**, [S.L.], v.138, n. 3-4, p.1785-1793, 2019.

MARTINS, C. A. S.; REIS, E. F.; NOGUEIRA, N. O. Análise do desempenho da irrigação por microspray na cultura do café conilon. **Enciclopédia Biosfera**, Jandaia, v. 7, [S.N.], p.1-13, 2011.

MAUDER, M.; FOKEN, T. Documentation and Instruction Manual of the Eddy Covariance Software Package TK2. Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, 2004, p. 44.

MONCRIEFF, J.; CLEMENT, R.; FINNIGAN, J.; MEYERS, T. Averaging, Detrending, and Filtering of Eddy Covariance Time Series. In: LEE, X.; MASSMAN, W. **Handbook of Micrometeorology**: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis. Dordrecht: **Springer Netherlands**, p. 7-31, 2004.

MONCRIEFF, J. B.; MALHI, Y.; LEUNING, R. The propagation of errors in longterm measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water. **Global change biology**, Illinois, v. 2, n. 3, p. 231-240, 1996.

NASSIF, D. S. P; MARIN, F. R.; COSTA, L. G. Evapotranspiration and transpiration coupling to the atmosphere of sugarcane in Southern Brazil: Scaling up from leaf to field. **Sugar Tech**, Uttar Pradesh, v. 16, n. 3, p. 250-254, 2014.

UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Acesso à base diária: Canal CLIMA. Ilha Solteira: UNESP - Faculdade de Engenharia - Departamento de Fitossanidade e Engenharia Rural e Solos - Área de Hidráulica e Irrigação, 2019. Disponível em: Acesso em 10 de julho de 2019.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. H. B.; BISPO, R. C. B.; TEIXEIRA, A. H. C. Aplicação do algoritmo SAFER para determinação da evapotranspiração em canaviais irrigados por diferentes sistemas. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, IRRIGA & INOVAGRI, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2019.

PARKES, M.; YAO, W. W.; MA, X. Y.; LI, J. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, Berlin, v. 29, n. 4, p. 331-339, 2010.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Stuttgart, v. 185, n. 4, p. 249-258, 2000.

SHUTTLEWORTH, W. J. Putting the “vap” into evaporation**. Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, v.11, n. 1, p. 210-244, 2007.

VICKERS, D.; MAHRT, L. Quality Control and Flux Sampling Problems for Tower and Aircraft Data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Boston, v. 14, n. 3, p. 512-526, 1997.

TROMBETA, N. C.; CAIXETA-FILHO, J. V. Energy potential of sugarcane biomass: an application of optimal location modelin. **Sugar Industry**, Zuckerindustrie, v.142, n. 7, p. 407-415, 2017.

TWINE, T. E.; KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M.; COOK, D. R.; HOUSER, P. R.; MEYERS, T. P.; PRUEGER, J. H.; STARKS. P. J.; WESELY, M. L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology,** Amsterdam, v. 103, [S.N.], p. 279-300, 2000.

WATANABE, K.; YAMAMOTO, T.; YAMADA, T.; SAKURATANIA, T.; NAWATA, E.; AKADET, N.; HIGUCHIA, H. Changes in seasonal evapotranspiration, soil water

content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 67, p. 133-143, 2004.

WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Malden, v. 106, n. 447, p. 85-100, 1980.

WILSON, K.; GOLDSTEIN, A.; FALGE, E.; AUBINET, M.; BALDOCCHI, D.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; CEULEMANS, R.; DOLMAN, H.; FIELD, C.; GRELLE, A.; IBROM, A.; LAW, BE.; KOWALSKI, A.; MEYERS, T.; MONCRIEFF, J.; MONSON, R.; OECHEL, W.; TENHUNEN, J.; VALENTINI, R.; VERMA, S. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 113, [S.N.], p. 223-243, 2002.

CAPÍTULO 2 - ESTIMATIVA DA EVAPOTRASPIRAÇÃO ATUAL DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR COM APLICAÇÃO DO HÍBRIDO SETMI

RESUMO: Esta pesquisa teve como objetivo comparar os resultados da evapotranspiração atual (ETa) em cultivo da cana-de-açúcar, obtida por medições de campo e por imagens de satélites, estimada pelo modelo híbrido na interface Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface (SETMI), este baseado na estimativa do balanço de energia e no coeficiente de cultivo basal (Kcb), com uso de imagens Landsat e dados climáticos, no período de 27 de junho de 2016 a 28 de junho de 2018, representando duas safras completas. A relação entre Kcb e o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) foi obtida usando os dados de fluxos de calor latentes (λE) provenientes de um sistema de *Eddy Covariance* (EC). Além da ETa, as condições de estresse hídrico e as necessidades de água da cultura também foram analisadas. A relação entre SAVI e Kcb resultou em um R^2 alto (> 80%). A modelagem pelo SETMI mostrou valores diários confiáveis de ETa para cana-de-açúcar no noroeste do Estado de São Paulo, confirmando a aplicabilidade do modelo sob condições tropicais.

Palavra-chave: Modelagem, armazenamento de água, irrigação

ABSTRACT: This research aimed to compare the results of actual evapotranspiration (ETa) in sugarcane crop, obtained by field measurements and satellite images, estimated by the hybrid model in the Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface (SETMI), which is based on the energy balance estimate and the basal crop coefficient (Kcb), using Landsat images and climatic data, from 27 June 2016 to 28 June 2018, representing two complete harvests. The relation between Kcb and the soil-adjusted vegetation index (SAVI) was obtained using data on latent heat flux (λE) from an Eddy Covariance (EC) system. In addition to the ETa, the water stress conditions and the water requirements of the crop were also analyzed. The relation between SAVI and Kcb resulted in a high R2 (> 80%). The modeling by SETMI showed reliable daily values of ETa for sugarcane in the northwest of São Paulo state, confirming the applicability of the model under tropical conditions.

Keyword: Modeling, water storage, irrigation

2.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com mais de 8 milhões de hectares cultivados, apresentando uma produção total de aproximadamente 640 milhões de toneladas, sendo o Estado de São Paulo o destaque nacional. Entretanto a produtividade no Brasil está em torno de 75 t ha^{-1}, muito abaixo daquela atingida em áreas irrigadas, devido principalmente ao estresse hídrico em fases críticas da cultura (CONAB, 2019). Trabalhos recentes demostram que a irrigação pode dobrar este índice, como reportado por Gonçalves et. al. (2019), em estudo realizado no Estado de São Paulo.

A otimização do uso da água na agricultura irrigada tem um papel importante a frente dos desafios econômicos e ambientais para garantia da rentabilidade da atividade agrícola, e sustentabilidade dos recursos hídricos. Contudo, para a expansão da atividade com bons níveis de produtividades em cenários de crescente demanda por alimentos e insumos, é importante a utilização de métodos eficientes e de baixo custo, para estimativa da evapotranspiração atual (ETa), proporcionando um manejo racional da água de irrigação.

Métodos de estimativa da ETa por sensoriamento remoto (SR), através de imagens de satélite, têm sido usados, tanto para escalas de campo, quanto para largas escalas, em vários agros-ecossistemas no Brasil e no mundo, podendo-se citar os trabalhos recentes de Venâncio et al. (2019), Foster et. al. (2019), Gonçalves et. al. (2020) e Campos et. al. (2018), colaborando para o monitoramento e manejo dos recursos hídricos e, especificamente na agricultura irrigada.

Uma das mais comuns metodologias baseadas em SR utilizadas para estimar ETa são os modelos que utilizam o balanço de energia através da banda termal considerando uma fonte, a superfície terrestre é modelada como única, como SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) e METRIC (Allen at. al., 2007), ou duas fontes, em que a superfície é dividida entre solo e vegetação, como por exemplo ALEX-DisALEX (ANDERSON et. al., 1997, MECIKALSKI et. al., 1999 e NORMAM et al., 2003). Estes modelos requerem dados climáticos instantâneos, índices biofísicos de refletância da vegetação e imagens multiespectrais para a estimativa dos componentes do balanço de energia, incluindo a evapotranspiração.

Um dos métodos empregados, utilizado no estudo corrente, é baseado na abordagem do coeficiente de cultura basal, em função dos valores de refletância

espectral (Kcbrf) derivados de índices de vegetação (IV) como por exemplo NDVI (*Normalized difference Vegetaion Index*) e SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*). Os valores de Kcbrf são usados na contabilidade dos componentes do balanço hídrico (RSWB), sendo descrito no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

Os coeficientes de cultivo baseados em refletância têm sido amplamente avaliados e aplicados em várias culturas (CAMPOS et. al. 2016; CAMPOS et. al. 2017; GONZÁLEZ-DUGO et. al. 2013 e GONÇALVES, et al. 2020). Outro método utilizado nesta pesquisa é o modelo hibrido de duas fontes (*Spatial EvapoTranspiration Modelling Interface* - SETMI) (GELI e NEALE, 2012; NEALE et al., 2012), e nesta abordagem, o balanço de água na zona radicular é atualizado para cada nova estimativa de ETa gerada do TSEB, de acordo com Norman et. al., (1995).

O modelo híbrido SETMI aplicado neste estudo engloba o balanço de energia de duas fontes com a utilização de imagens multiespectrais e termais, dados biofísicos e de clima para a estimativa da ETa, para tanto, este trabalho desenvolveu uma equação através do Kcb medido pela torre de fluxo em campo e índice de vegetação (IV) através do SR para alimentar o modelo RSWB no SETMI.

O objetivo foi avaliar os resultados da estimativa de ETa do SETMI utilizando o modelo híbrido de balanço de energia e o modelo do coeficiente de cultivo baseado na reflectância, este último após o desenvolvimento de uma nova relação Kcb x SAVI, comparando-os com dados obtidos a partir do sistema de correlações turbulentas (*Eddy Covariance*) para duas safras de cultivo da cana-de-açúcar na região Noroeste do Estado de São Paulo.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Descrição da área de estudo

A pesquisa foi realizada em uma área comercial de 23,6 hectares no município de Andradina, Estado de São Paulo, Latitude 20° 43' 43,6” S, Longitude 51º 16' 30,3” O , 360 metros de altitude ver Figuras 1a e 1b, cultivada com cana-de-açúcar em duas socas de cultivo, quarto e quinto corte (27 de junho/2016 a 28 de junho/2018) com a variedade RB96 - 6928

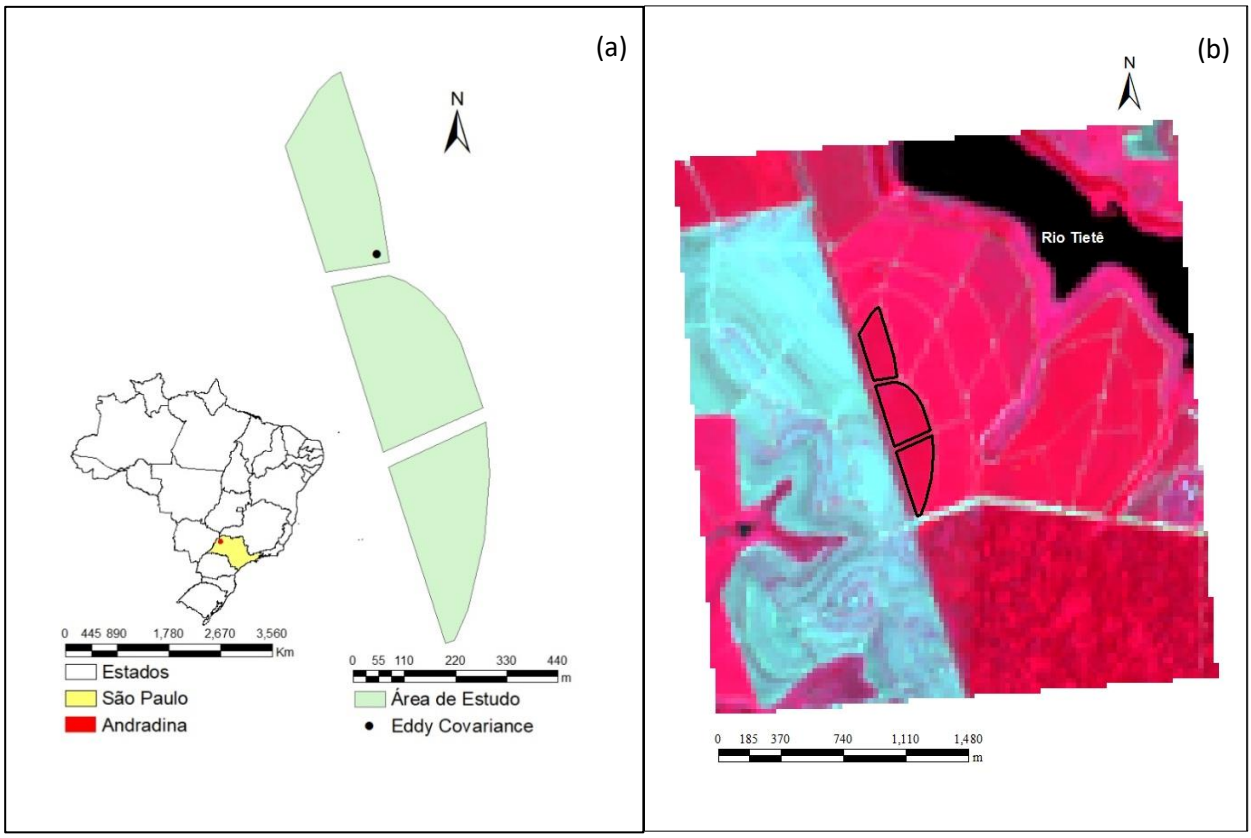

Figura 1. Localização da área de estudo, (a) área de estudo com localização da Torre *Eddy Covariance*; (b) Área de estudo em composição de cores RGB falsa cor das bandas 5/4/3 do Landsat 8.

O clima da região segundo a classificação de Koppen é do tipo tropical com inverno seco (Aw) (PEEL et al., 2007) com precipitação anual média 1.242 mm, evapotranspiração de referência média anual 1536 mm, radiação solar média de 17,2 MJ m^{-2} dia^{-1}, temperatura do ar entre de 19,7 a 26,9ºC e umidade relativa média é de 62,4% (UNESP, 2019).

O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico (SANTOS et al. 2018), com composição granulométrica para camada de 0-0,20 m com 76,4% de areia, 10,6% de silte e 13% de argila, densidade do solo de 1,60 g cm^{-3}, estabelecendo uma porosidade total de 34%, e capacidade de água disponível (CAD) de 1,2 mm cm^{-1}. Já na camada 0,20-0,40 m apresenta-se com 75,6% de areia, 8,4% de silte e 16% de argila, densidade do solo de 1,64 g cm^{-3}, porosidade total de 32,3% e CAD de 1,3 mm cm^{-1}; e na camada 0,40-0,60 m com 72,8% de areia, 7,1% de silte e 20,1% de argila, densidade do solo de 1,58 g cm^{-3}, porosidade total de 35,6% e CAD de 1,2 mm cm^{-1}.

Os dados climáticos utilizados foram da Estação Itapura que faz parte da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (http://clima.feis.unesp.br) com a

evapotranspiração de referência (ETo) estimada pela equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

A cultura foi instalada em 15 de setembro de 2013 (cana planta) com espaçamento de 0,90 m entre linhas simples e 1,5 m entre linhas duplas. A irrigação foi realizada através de um sistema de gotejamento subsuperficial enterrados a 0,40 m de profundidade sob as linhas de plantio, com vazão do emissor de 1 L/hora.

2.2.2 Método das correlações turbulentas

No campo foi instalada uma torre equipada com sensores para medir os elementos micrometeorológicos e os componentes do balanço de energia determinados pelo método das correlações turbulentas (*Eddy Covariance* - EC), para alimentar os dados de entrada do SETMI e comparar os resultados medidos com os estimados pelo modelo.

A torre era constituída por um anemômetro sônico tridimensional e analisador de gás IRGASON (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA), posicionados considerando a direção do vento predominante, com um registrador de dados (CR 3000, Campbell Scientific Instruments, Utah, EUA) para registrar dados brutos de alta frequência a 10 Hz (10 dados por segundo) de medidas a 8,0 m de altura.

As variáveis micrometeorológicas que foram medidas acima do dossel: saldo de radiação resultante das medições separadas de todos os componentes do balanço de radiação (CNR4, Net radiometer - Kipp & Zonen, Delft, Holanda); e precipitação (CS700-L, Hydrological Services Pty. Ltd., Sidney, Austrália), esses equipamentos foram fixados 5,0 m de altura. No solo, foram instalados fluximetros para mensurar o fluxo de calor no solo (HFP01-L, Campbell Scientific, Inc. Logan, Utah, EUA). Os dados de baixa frequência foram coletados continuamente em intervalos de 10 segundos com médias ou totalizações de 30 minutos.

Os dados brutos do sistema EC (10 Hz) foram processados utilizando software *Eddy Pro Advanced* (V 3.0 e 4.0 - LI-COR, Lincoln, NE, EUA), na configuração padrão do software para verificações de séries temporais (VICKERS E MAHRT, 1997), filtros de baixa e alta frequência (MONCRIEFF et al., 1997, 2004), correção de inclinação do anemômetro com rotação dupla (WILCZAK et al., 2001), flutuações de densidade (WEBB et al., 1980), minimização do atraso usando covariância máxima com padrão

defasagem de zero e cálculo da detecção do limiar (u*) usando ambos ao longo e cisalhamento transversal do vento.

O *Footprint* foi calculado seguindo Kljun et al. (2004) e bandeiras de qualidade determinadas por Mauder e Foken (2004). Para o preenchimento de falhas e particionamento de fluxo foi utilizado o software TOVI (V 3.0 e 4.0 - LI-COR, Lincoln, NE, EUA). Todos os dados brutos foram processados obtendo médias de 30 minutos.

Os dados de fluxos obtidos, resultaram em um fechamento geral do balanço do balanço de energia na escala diária de cerca de 75,5%. Em alguns casos, isso permite uma quantidade considerável da energia disponível (Rn - G) não contabilizada na partição em fluxos de calor latente e sensível (λE + H), que poderiam causar discrepâncias significativas nas comparações com os resultados provenientes de sensoriamento remoto.

Os erros inerentes a Rn, λE, H e G, são reportados como 5% a 10%, 15% a 20%, 15% a 20%, e 20% a 30%, respectivamente, de acordo com Weaver (1990), Field et al. (1994). Por esse motivo, a Razão de Bowen obtida com dados da torre de fluxo foi usada para ajustar λE e He forçar o fechamento seguindo o procedimento sugerido por Twine et al. (2000), descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Procedimento de ajuste do fechamento do balanço de energia do sistema de correlações turbulentas.

$$\boldsymbol{\beta = Razão\ de\ Bowen = H/LE}$$

$$\boldsymbol{\Delta LE = \{(R_n - G) - [(1 + \beta) * LE]\}/(1 + \beta)}$$

$$\boldsymbol{\Delta H = [\beta * (LE + \Delta LE) - H]}$$

$$\boldsymbol{*LE_{ff} = LE\ (mensurado) + \Delta LE}$$

$$\boldsymbol{*H_{ff} = H\ (mensurado) + \Delta}$$

$$\boldsymbol{(R_n - G) = (H + \Delta H) + (LE + (\Delta LE)}$$

*LE_{ff} e H_{ff} são os fluxos de calor latente e sensível forçando o fechamento do balanço de energia.

Os valores de λE que representam energia por unidade de área e por unidade de tempo, foram convertidos em unidade de lâmina evaporada e, ou, transpirada em um dado intervalo de tempo, ou seja, a ETa.

2.2.3 *Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface* - SETMI

O SETMI inclui vários modelos de evapotranspiração baseados em SR e está implementado na plataforma do ArcGIS (ESRI, Redlands, CA). É a interface em que o modelo híbrido de estimativa de ETa de Neale et al. (2012) está inserido atualmente.

O modelo híbrido é a junção do modelo de ET baseado no balanço de energia de duas fontes (TSEB) (Norman et al., 1995) com o modelo de balanço hídrico que utiliza coeficientes de cultura baseados em refletâncias espectrais (Kcbrf). A parte Kcbrf do modelo permite que o balanço hídrico seja calculado com um intervalo de tempo diário quando as imagens são menos frequentes dependendo do sensor utilizado (ALLEN et al., 1998). A inclusão do modelo híbrido fornece uma espécie de verificação de erro no balanço hídrico produzindo uma segunda estimativa de ETa (NEALE et al., 2012).

Ao incorporar o TSEB, o modelo de balanço hídrico pode ser ajustado para reconciliar o ETa estimada quando cada nova imagem é incorporada (NEALE et al., 2012). Dessa forma, neste estudo foram aplicadas duas abordagens para a estimativa da ETa aplicando o modelo SETMI, a primeira, é a aplicação do SETMI através do modelo de balanço de energia de duas fontes (TSEB) de forma isolada (NORMAN et. al., 1995). A segunda abordagem, é a aplicação do modelo hibrido fundamentada na estimativa da ETa baseada na reflectância através da relação IV x Kcbrf (indice de vegetação x coeficiente basal da cultura reflectância) compondo o balanço de água na zona radicular ou seja o balanço hídrico (RSWB) (ver ALLEN et al., 1998 e BAUSCH e NEALE,1987), considerando a interação entre o modelo do balanço de energia de duas fontes para o ajuste do balanço hídrico (GELI e NEALE, 2012; NEALE et al., 2012).

2.2.3.1 Estimativa da ETa baseado no modelo de energia de duas fontes (TSEB)

Em relação ao TSEB, foi necessário estimar a temperatura da superfície através do da abordagem proposta pela USGS (https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgslandsat-level-1-data-product) utilizando a banda termal 10 (10.6 - 11.19 µm, 100 m resolução) para o Landsat 8.

Para tanto, primeiramente foi realizado a conversão do número digital (ND) em

radiância no topo da atmosfera através da equação 1.

$$L\lambda = ML * Qcal + Al \quad (01)$$

Lλ radiância espectral ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)
ML fator de escala multiplicativo para radiância = 0.0003342 (Landsat 8)
AL é o fator de escala aditivo para radiância = 0.1 (Landsat 8)
Qcal é os valores de número digital - DN).

Para converter a Lλ do topo da atmosfera para a superfície terrestre foi empregado a metodologia baseada em Brunsell e Gillies (2002), Barsi et. al. (2003) e Barsin et. al. (2005) através de coeficientes disponíveis em uma plataforma online (https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/) e aplicando a equação 2:

$$L\lambda s = \frac{\frac{L\lambda - Lu}{T} - (1-e) * Ld}{e} \quad (02)$$

Lλs radiância espectral de superficie ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$))
Lλ radiância espectral topo da atmosfera ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$))
e ε a emissividade
Lu, T, Ld = coeficientes de ajuste (https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/).

Após correção atmosférica, a radiância foi convertida em temperatura de superfície através da equação 3.

$$T_0 = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda s+1} - 273.15\right)} \quad (03)$$

T_0 é a temperatura na superfície terrestre (°C);
K1 é a constante de conversão térmica da banda = 774.89 (Landsat 8)
K2 é a constante de conversão térmica da banda = 1321.08 (Landsat 8)
Lλs é a radiância espectral de superfície ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)

Além da imagem de temperatura de superfície, os dados de entrada para o TSEB utilizando SETMI envolve dados climáticos instantâneos obtidos através da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista, biofísicos e imagens multiespectrais de superfície de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Dados de entrada para estimativa do balanço de energia (TSEB) utilizando o SETMI.

Dados climáticos	**Referência**
Temperatura do ar instantânea (°C)	Estação agrometeorológica
Evapotranspiração de referência diária (ETo) (mm dia^{-1})	Estação agrometeorológica
Evapotranspiração de referência instantânea (mm h^{-1})	Allen et al., (1998)
Altura da vegetação no local de medição da velocidade do vento (m)	Allen e Wright (1997)
Altura da cobertura do solo regional (m)	Allen e Wright (1997)
Fator de ajuste da velocidade do vento para a área modelada	Allen e Wright (1997)
Fator de ajuste da velocidade do vento para estação meteorológica	Allen e Wright (1997)
Velocidade do vento instantânea (m s^{-1})	Estação agrometeorológica
Radiação solar incidente instantânea (W m^{-2})	Estação agrometeorológica
Pressão de vapor instantânea (kPa)	Estação agrometeorológica
Pressão atmosférica instantânea (kPa)	Estação agrometeorológica
Altura de medida da velocidade do vento e do ar (m)	Estação agrometeorológica
Imagens de satétite	**Referência**
Multiespectrais - banda do vermelho e vermelho próximo (*level 2*)	https://glovis.usgs.gov/
Termal	https://glovis.usgs.gov/
Parâmetros biofísicos	**Referência**
α Leaf VIS (Absorção de folhas verdes na faixa visível) = 0,83	Campbell e Norman (2012)
α Leaf NIR (Absorção de folhas verdes na faixa do vermelho próximo) = 0,35	Campbell e Norman (2012)
α Leaf TIR (Absorção de folhas verdes na faixa termal) = 0,95	Campbell e Norman (2012)
α Dead VIS = 0,49 (Absorção de folhas mortas na faixa visível)	Campbell e Norman (2012)
α Dead NIR = 0,13 (Absorção de folhas mortas na faixa do vermelho próximo)	Campbell e Norman (2012)
Fg = 1 (Fração de folhas verdes)	Campbell e Norman (2012)
S = 0,05 (usado para calcular a velocidade do vento dentro do dossel)	Norman et. al. (1995)
Wc = 0,76 (largura do dossel)	Kustas e Norman (1999)
Refl Soil VIS = 0,15 (Refletância do solo na faixa visível)	Colaizzi et al. (2012)
Refl Soil NIR = 0,25 (Refletância do solo na faixa do vermelho próximo)	Colaizzi et al. (2012)
ε Soil TIR = 0,96 (Emissividade do solo na faixa visível)	Brunsell e Gillies (2002)
Ag = 0,3 (Proporção de fluxo de calor no solo e saldo de radiação no dossel)	Brutsaert (1982)
D = 1 (Proporção entre altura e largura do dossel)	Houborg et al., 2009
Rc Ini = 50 (Resistência da copa? inicial ao dossel)	Colaizzi et al., (2014)
Rc Max = 1000 (Resistência máxima ao dossel)	Colaizzi et al., (2014)

2.2.3.2 Estimativa da ETa através do balanço de água no solo baseado na reflectância (RSWB)

O modelo de balanço hídrico do solo aplicado neste estudo não difere das

abordagens anteriores publicadas para outras culturas (GONZALEZ-DUGO et al., 2009; CAMPOS et al., 2016). A metodologia é essencialmente o balanço hídrico do solo proposto no Boletim FAO 56, com adições para simular a evaporação da camada superior do solo e assimilar a evolução temporal do Kcb derivado dos IVs, entretanto considerando a interação entre o modelo do balanço de energia de duas fontes para o ajuste do balanço hídrico no sistema radicular (GELI e NEALE, 2012; NEALE et al., 2012).

Além disso, RSWB no SETMI relaciona o crescimento das plantas, como cobertura do solo e profundidade do sistema radicular, analisados entre seus valores máximos e mínimos propostos no manual FAO-56 (ALLEN et al., 1998) e considerando os valores de Kcb derivados de sensoriamento remoto, além de considerar três camadas de solo separadas ao longo do seu perfil para aumentar a precisão dos resultados. Para detalhes sobre RSWB aplicando SETMI consultar Barker (2017).

Primeiramente, para o balanço de hídrico, foi desenvolvido uma relação entre IV x Kcb para a cultura da cana-de-açúcar baseado nas condições microclimáticas, climáticas e a partir de imagens de satélite, então uma nova relação para alimentar o modelo SETMI para a estimativa dos componentes do balanço hídrico do solo baseado na abordagem de sensoriamento remoto (SR) foi realizada. Para tanto, esta abordagem utilizou o IV ajustado para o solo conhecido como SAVI - *Soil Adjusted Vegetaion Index* - (HUETE, 1988) segundo a equação 4 utilizando imagens corrigidas para reflectância de superfície através do sensor satélite landsat 8 OLI (*level 2*) considerando as duas socas de cultivo. As imagens foram obtidas através de uma plataforma online da USGS (glovis.usgs.gov/app?fullscreen=1).

$$SAVI = \frac{NIR+RED}{NIR-RED+L} * (1 + L) \quad (04)$$

SAVI é o índice de vegetação ajustado a cobertura do solo

NIR é o valor de reflectância da banda do vermelho próximo (0.845-0.885 µm; 30 m resolução)

RED é o valor de reflectância da banda do vermelho próximo (0.630-0.680 µm; 30 m resolução)

L é o valor de cobertura do solo pela vegetação verde, valor = 0.5.

Os valores do SAVI foram calculados *pixel* por *pixel* e considerando uma média para todo o campo de cultivo, com uso de uma camada vetorial de "*shapefile*" com um "*buffer*" de 20 metros da borda para evitar efeitos de bordadura.

O Kcb foi calculado usando dados do sistema de *EC* e da estação agrometeorológica vizinha, através da equação 5.

$$\mathrm{Kc} = \mathrm{Kcb} + \mathrm{Ko} = \frac{\mathrm{ET}_a}{\mathrm{ET}_o} \quad (05)$$

Kc é o coeficiente de cultura
Kcb é o coeficiente basal da cultura
Ko é o coeficiente de evaporação
ETa é a evapotranspiração atual
ETo é a evapotranspiração de referência

Os valores de Kc durante o período de cultivo foram considerados iguais aos valores de Kcb, pois as datas escolhidas para desenvolver a relação IV x Kcb foram quatro dias após irrigação ou evento de chuva, dessa forma o efeito da evaporação da superfície do solo (Ko) sobre os valores de Kcb são nulos não influenciando sobre os valores de Kcb enquanto a transpiração ocorrendo potencialmente sem qualquer limitação, para mais detalhes consultar Campos et al. (2017). Os valores de ETo foram coletados na estação automática próxima a área de estudo. Dessa forma, foi desenvolvida a relação IV x Kcb e inserida no SETMI para a cana-de-açúcar.

Para a obtenção do Kcb diário o SETMI aplica uma regressão linear baseado em Graus-Dia acumulados para obter o SAVI diário e consequentemente convertido em Kcb através da relação SAVI x Kcb estabelecida (CAMPOS et. al., 2017).

Foram estabelecidos valores de SAVI para solo exposto de 0,12 na colheita no fim da maturação da cultura 0,45 para um Kcb final de 0,7, sendo esse descrito em Allen et al. (1998). A ocorrência de um valor de Kcb maior que 0 para condições de solo descoberto tem sido demostrado repetidamente na literatura e Wright (1982) propôs o uso de um Kcb residual igual a 0,15, mesmo na ausência de vegetação, também encontrado no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998) e na maioria das relações empíricas publicadas entre Kcb e IV (por exemplo, BAUSCH e NEALE, 1987; CAMPOS et al., 2010; HUNSAKER et al., 2003; NEALE et al., 1989). Como demonstrado empiricamente por Torres e Calera (2010), essa evaporação residual

pode ser esperada para solo nu por mais de 30 dias após os eventos de irrigação ou precipitação, mesmo na total ausência de plantas vivas transpirando no campo.

Os dados de entrada para o RSWB utilizando SETMI envolve dados climáticos, da cultura, imagens multiespectrais de superfície e dados de solo de acordo com a Tabela 3.Os dados de solo foram obtidos a partir de observação de campo, obtenção de curva de retenção, analise da velocidade de infiltração e dados de umidade do solo.

Tabela 3. Dados de entrada para estimativa do balanço de água no solo (RSWB) utilizando o SETMI.

Dados climáticos	**Referência**
Temperatura máxima (°C)	Estação agrometeorológica
Temperatura mínima (°C)	Estação agrometeorológica
Evapotranspiração de referência (ETo) (mm dia^{-1})	Estação agrometeorológica
Precipitação (mm)	Torre de Fluxo
Irrigação (mm)	Dados de campo
Dados de solo	**Referência**
Capacidade de campo - raster (mm m^{-1})	Dados de campo
Ponto de murcha permanente - raster (mm m^{-1})	Dados de campo
Conteúdo volumétrico inicial de água no solo - raster (mm m^{-1})	Dados de campo
Espessura da camada do solo (3 camadas) - raster (m)	Dados de campo
Condutividade hidráulica saturada - raster (mm d^{-1})	Dados de campo
Imagens de satétite	**Referência**
Multiespectrais - banda do vermelho e infra vermelho próximo	https://glovis.usgs.gov/
Dados da cultura	**Referência**
Método de irrigação (gotejamento subsuperficial)	Dados de campo
Profundidade da camada de evaporação (m)	Allen et al., (1998)
Altura máxima e mínima da cultura (m) (5,2 e 0,10 m)	Dados de campo
Data de início e fim do balanço hídrico no solo (dias julianos)	Dados de campo
Falso SAVI no plantio (0,12)	Campos et. al. (2017)
Falso SAVI na colheita (0,45)	Allen et al., (1998)
SAVI no pico de desenvolvimento da cultura	Dados observados
Eficiência de irrigação (0,95)	Dados de Campo
Precipitação efetiva	USDA-NRCS, 2004
Kc máximo (1,2)	Allen et al., (1998)
Fração de depleção (0,4)	Allen et al., (1998)
Profundidade mínima do sistema radicular (m) (0,6 m)	Dados de Campo
Profundidade máxima do sistema radicular (m) (0,8 m)	Dados de Campo

Os dados de ETa do SETMI baseados no modelo híbrido e TSEB foram comparados aqueles provenientes da torre de fluxo (*eddy covariance*), além de uma análise detalhada do balanço de água no solo para a cana-de-açúcar através de todos os componentes estimados pelo modelo híbrido (Figura 2.).

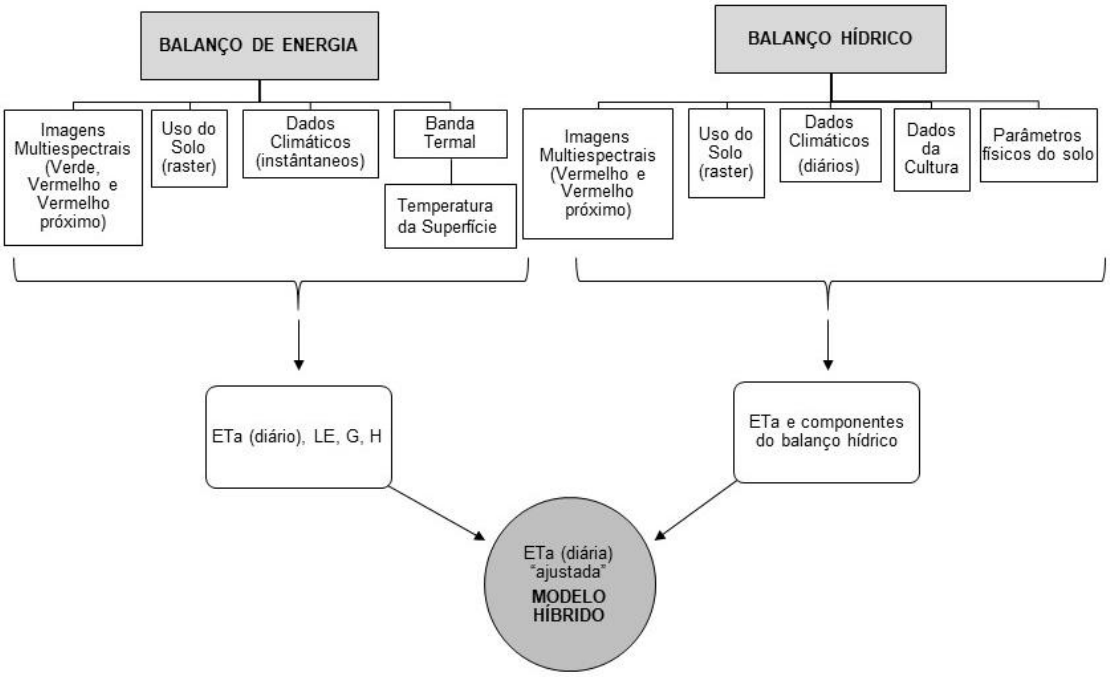

Figura 2. Resumo do fluxograma com as etapas do modelo SETMI.

2.2.4 Análise dos Dados

Foi utilizado o *software* ArcGis 10.0 para extração dos dados e o Microsoft Excel para compilação destes, construção de gráficos e análise de regressão linear em que se consideraram os indicadores estatísticos, R-quadrado que indica a relação de à aproximação dos valores estimados em relação aos observados que varia entre 0 e 1, sendo o ajuste perfeito igual a 1 e coeficiente de correlação simples de Pearson "r", que indica o grau de dispersão dos pontos em relação à média e a precisão do método.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{(O_i - O)^2} \quad (6)$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{(O_i - O)^2}} \quad (7)$$

Em que que O_i valor observado (ETa *Eddy Covariance*), mm; E_i é o valor estimado (ETa obtida pelo SAFER), mm; O é a média dos valores observados, mm.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizado o comparativo da ETa estimada a partir do algoritmo SETMI com base no balanço de energia de duas fontes e a ETa estimada pelo sistema EC. A regressão (Figuras 3a e 3b) utilizada foi linear, onde para as duas safras o R^2 apresentaram valores superiores a 0,70 ajustando os resultados das variáveis, e ainda, a correlação de Pearson “r” apresentou um valor de r igual a 0,84 no para o quarto corte e 0,90 para o quinto corte.

Alguns pesquisadores classificam valores de r igual a 0,10 até 0,30 (fraco); de 0,40 até 0,6 (moderado) e 0,70 até 1 (forte) (DANCEY e REIDY, 2006). Cohen (1988), contudo, tem uma outra classificação onde os valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; entre 0,30 e 0,49 como médios; e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Assim, as correlações no presente estudo, para as duas safras analisadas, se apresentaram alta.

Ainda observando as Figuras 3a e 3b, nota-se que os resultados da aplicação modelo baseado no balanço de energia subestimou em alguns momentos e outros superestimou, quando comparados com os valores de ETa obtidos pelo sistema EC, provavelmente devido a combinação de diversos fatores ambientais e ainda a necessidade de calibração do modelo para diferentes condições climática.

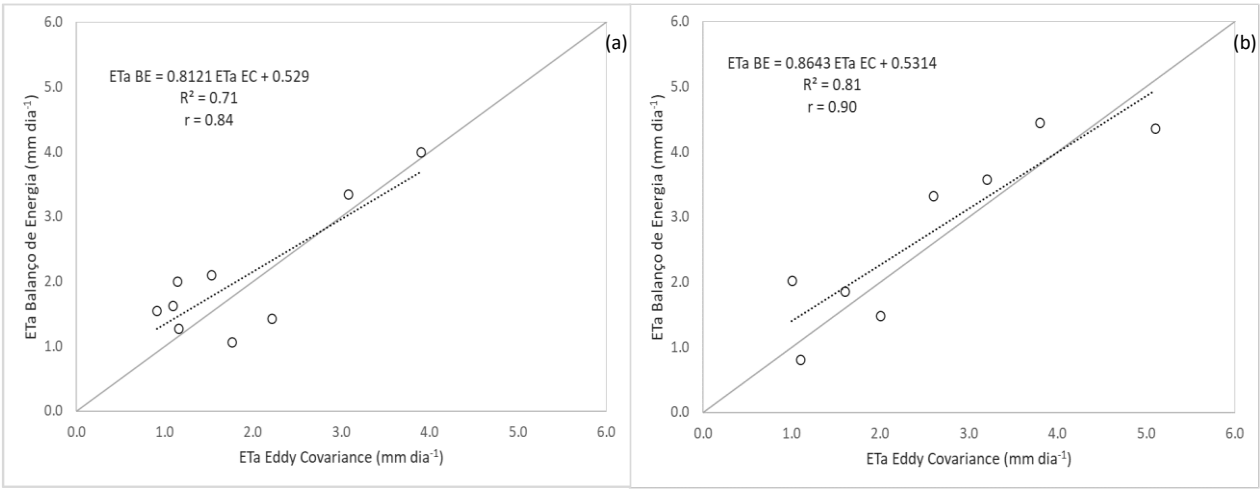

Figura 3. Comparativo da evapotranspiração atual (ETa) estimada pelo método *Eddy Covariance* (EC), com aquela estimada através do algoritmo SETMI com base no balanço de energia (ETa BE) na cana-de-açúcar. (a) Cana-de-açúcar no quarto corte, (b) Cana-de-açúcar no quinto corte.

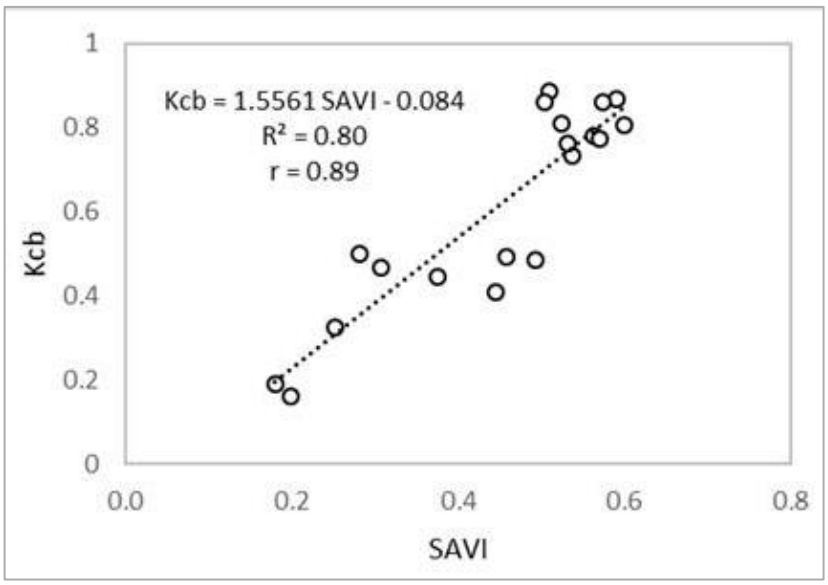

Figura 4. Correlação entre o coeficiente empírico basal da cultura (Kcb) e o e índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI) para a cultura da cana-de-açúcar.

Para utilização do modelo híbrido foi feita a relação Kcb x SAVI, a partir de uma correlação linear simples que foi baseada nos valores Kcb obtidos por medições de campo e por sensoriamento remoto, para a área com cana-de-açúcar (Figura 4).

Os valores máximos de Kcb obtidos em campo foram, em média 0,88. Os valores do SAVI na cobertura efetiva foram de 0,61, enquanto os valores mínimos do SAVI estiveram em torno de 0,18. A equação linear resultante apresentada na Figura 3 indica uma boa concordância do SAVI por satélite com as medições experimentais, com valor do R^2 de 0,80 e o r de 0,89.

De acordo com Campos et al. (2017), uma correlação linear simples é válida para reproduzir os relacionamentos experimentais Kcb-SAVI e o uso de abordagens exponenciais é uma melhoria que pode ser utilizada, permitindo uma estimativa mais precisa dos valores de Kcb durante a safra no estágio de desenvolvimento.

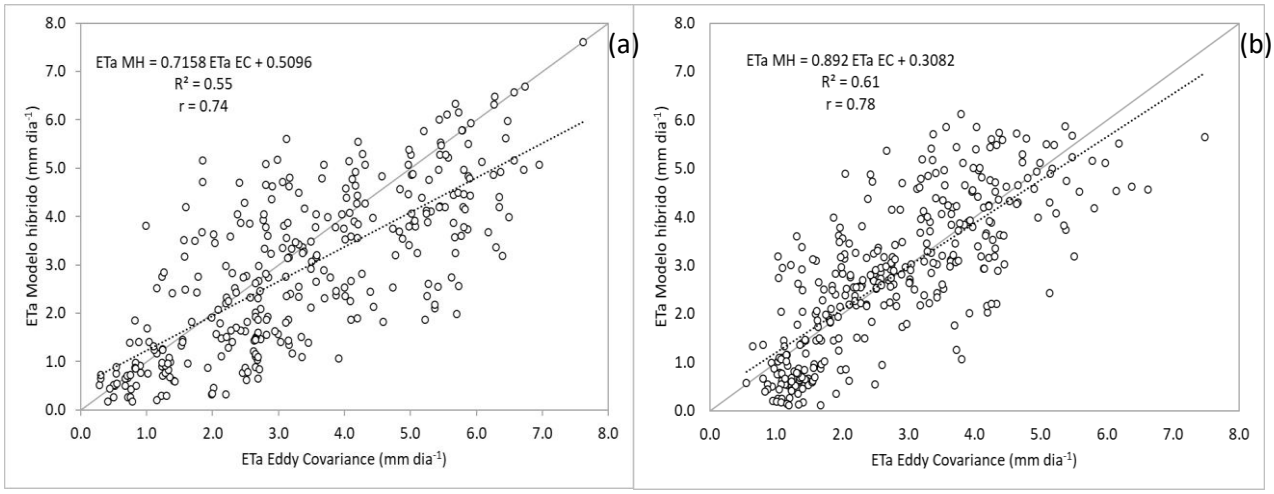

Figura 5. Comparativo da evapotranspiração atual (ETa) obtida pelo método *Eddy Covariance*, com aquela estimada utilizando o algoritmo SETMI com base no modelo híbrido (ETa MH) na cana-de-açúcar. (a) quarto corte, (b) quinto corte.

Nas Figuras 5a e 5b as regressões lineares mostram que no quarto corte o R^2 apresentado foi de 0,55 e para a safra de quinto corte o R^2 foi superior com valor igual a 0,61. No modelo híbrido, a correlação foi menor nas duas safras quando comparados com os valores de ETa estimada pelo método de *Eddy Covariance*, contudo neste modelo a estimativa é feita diariamente e há necessidade de dados de climáticos e de campo tornando o método muito mais minucioso pela combinação de um número maior de parâmetros.

Nas Figuras 6a e 6b são apresentados a evolução da ETo e da ETa estimada pelo algoritmo SETMI com base no balanço de energia, bem como o baseado no modelo híbrido. Observa-se que os valores de ETa estimados têm similaridade com aqueles de ETo, corroborando com Allen et al. (1998), quem descreve que os valores da ETa são influenciados diretamente pelos de ETo.

Os valores de ETo ficaram em torno de 3,9 mm dia^{-1}, considerando as duas safras. Os valores da ETa variaram entre as safras em apenas 1,1%, sendo no quarto corte ET igual a 1.037 mm $safra^{-1}$ e no quinto corte 1.026 mm $safra^{-1}$, resultando em uma ET média de 2.8 mm dia^{-1}.

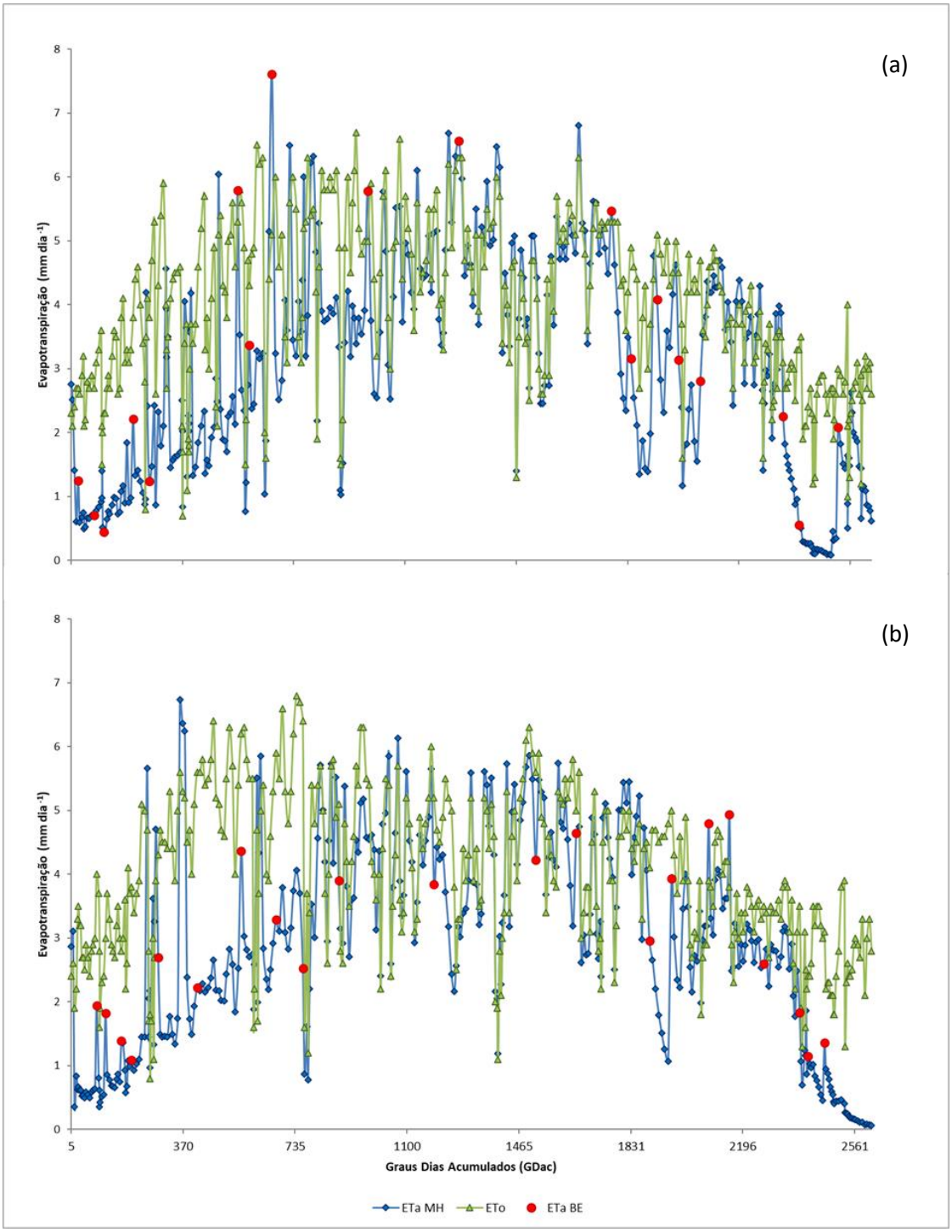

Figura 6. Evolução temporal da evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração atual (ETa). estimada utilizando a interface SETMI com base no método híbrido (ETa MH) e com base no balanço de energia (ETa BE). (a) quarto corte, (b) quinto corte.

Avilez et al. (2018) em estudo sobre necessidade hídrica da cana-de-açúcar, para essa mesma área desse trabalho utilizando a metodologia padronizada do Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998), encontraram valores de evapotranspiração da cultura (ETc) igual a 1.444 mm safra^{-1}. Neste último caso as taxas evapotranspiratórias representam condições em que não há restrição hídrica no solo

representada pelo Kc enquanto que tanto no SETMI, quando no *Eddy Covariance*, a ETa obtida a partir da observação das condições reais da cultura influenciada pela variação do armazenamento de água no solo, daí ser esperado valores menores, especialmente considerando que o sistema de irrigação por gotejamento em subsuperfície utilizado é capaz de oferecer apenas a irrigação de 3,0 mm dia^{-1}.

Portanto o armazenamento ideal de água no solo que não cause redução na ETa, neste caso, depende fortemente da ocorrência das chuvas em espaço de tempo regular, tendo em vista a capacidade de água disponível no solo em média de 1,2 mm cm^{-1} e nas duas safras, pelo sistema *Eddy Covariance*, em apenas 43% e 55% dos dias a ETa foi igual ou inferior à capacidade de irrigação do sistema, na quarta e quinta safra, respectivamente, enquanto que quando estimada pelo modelo híbrido SETMI, 46% e 45% dos dias a ETa esteve nessa situação. Resultado semelhante encontrado por Avilez et al. (2018), cujos resultados demonstraram um atendimento do consumo hídrico da cultura em apenas 30% dos dias do ano.

Sendo assim, as condições ambientais e de armazenamento de água na zona das raízes das plantas, podem explicar a diferença da ETc para ETa MH estimada pelo método híbrido.

Bosquilia et al. (2018), em estudo utilizando o algoritmo SETMI para estimativa da ETa por meio do método de balanço de energia no Estado de São Paulo, em análise anual para cana-de-açúcar, encontraram valor médio de 1.066 mm $safra^{-1}$ nos dois anos de estudo, semelhante ao do trabalho corrente.

Analisando as Figuras 7a e 7b, que mostram os dados de capacidade total de água disponível (CAD), água disponível (AD), depleção (Dr) e as entradas de água por irrigação (Irr) e precipitação (Prec), podemos notar que a CAD inicia com um valor aproximadamente de 58 mm, isso é devido a modelagem que associa ao crescimento radicular para definir os valores durante o ciclo.

Os valores de água disponível inicial no quarto corte foi em média de 41 mm e no quinto corte 43 mm, essa variação é devido a diferença no teor de água no solo no início de cada safra, que foi estimado a partir do potencial matricial no solo. Analisando as duas safras, é possível observar a Dr, ou seja, conteúdo de água na zona radicular que também pode ser expresso pelo esgotamento da zona radicular, na capacidade de campo, esse esgotamento na zona raiz é zero (Dr = 0). Quando a água do solo é extraída pela ETa, a Dr aumenta e o estresse é induzido quando Dr se torna igual a AD. Em alguns pontos a depleção da zona radicular excede AD, nesse caso a Dr é

alta o suficiente para limitar as taxas evapotranspiratórias.

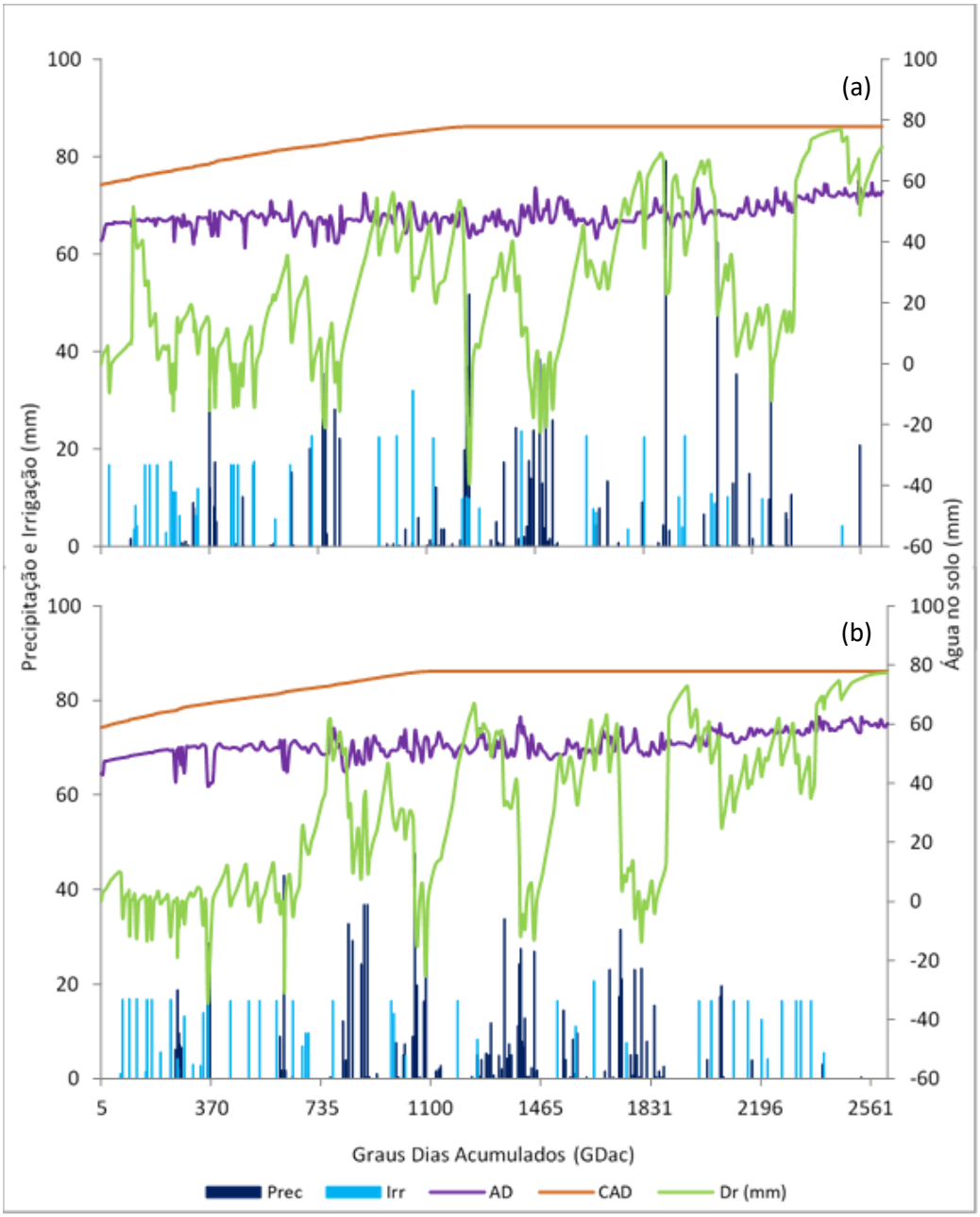

Figura 7. Evolução temporal da precipitação (Prec), irrigação (Irr), capacidade total de água disponível (CAD), água disponível (AD) e Depleção (Dr) na cultura da cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte.

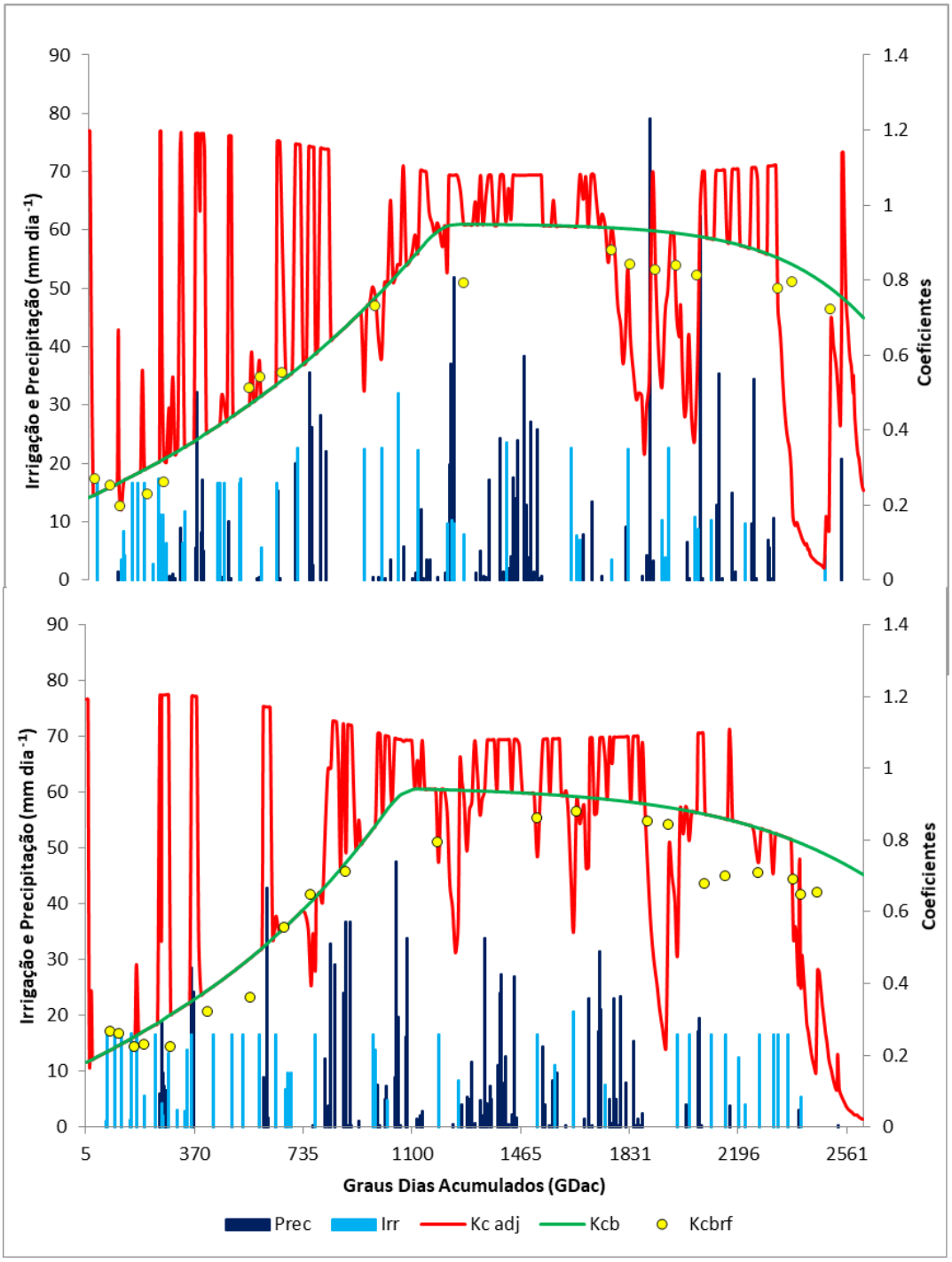

Figura 8. Evolução temporal da precipitação (Prec), irrigação (Irr), coeficiente basal da cultura (Kcb), coeficiente de cultura ajustado (Kc adj) e coeficiente basal da cultura com base na refletância (Kcbrf) para a cultura da cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte.

As Figura 8a e 8b apresentam as evoluções das curvas Kc ajustado e Kcb e os valores individuais de Kcbrf para cada safra. Analisando os valores do Kc ajustado, observa-se que quando a depleção foi maior que a água disponível (Figura 7a e 7b) o Kc foi menor que o Kcb, nessas condições pode-se afirmar que ocorreu limitação na disponibilidade de água causando o efeito de estresse hídrico. O maior valor de Kc

encontrado para as duas safras foi de 1,2 em média entre 250 e 380 Graus-Dia acumulados, quando a cultura está da fase de desenvolvimento.

Os valores do Kcbrf (Figura 8a e 8b) ao longo do ciclo da cultura foram inferiores aos tabulados por Allen et al (1998). Uma vantagem do método Kcbrf, é que o mesmo rastreia as condições reais de desenvolvimento da cultura no campo. De acordo com Neale et al. (2012), ainda é importante salientar que a diferença nos valores de Kcbrf entre as culturas afetará na estimativa da ETa.

2.4 CONCLUSÕES

Os modelos TSEB e híbrido, conforme programado no ambiente SETMI, quando utilizando imagens aéreas de média resolução como entrada em conjunto com dados climáticos e dados de campo, produzem valores da evapotranspiração confiáveis quando comparados com aqueles medidos a partir do sistema *Eddy Covariance*, pois são significativamente correlacionados.

Na relação Kcb x SAVI, os valores de SAVI correspondentes ao Kcb máximo foram 0,61 para as duas safras. O uso prático desta relação deve considerar que o valor máximo de Kcb está em torno de 0,95. Esses valores são obviamente afetados pela precisão das medições, característica da cultivar e manejo realizado na cultura, sendo assim valores de Kcb e SAVI podem ser maiores na cobertura efetiva, do que o relatado neste estudo.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; A.T.; MORSE, R.; TREZZA, W.; KRAMBER, I.; LORITE, AND C.W. ROBISON, Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S.L.], v. 133, n. 4, p. 395-406, 2007.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, Italy, p. 297, 1998.

ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L. Translating Wind Measurements from Weather Stations to Agricultural Crops. **Journal of Hydrologic Engineering**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 26-35,1997.

ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; DIAK, G. R.; KUSTAS, W. P.; MECIKALSKI, J. R. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. **Remote Sensing Environmental**, [S.L.], v. 60, [S.N.], p. 195-216, 1997:

AVILEZ, A. M. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; GIOVANELLI, L.B. Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial 30 anos PG Irriga, v. 1, n.1, p. 171-188, 2018.

BARKER, J. B**. Spatial Irrigation Management Using Remote Sensing Water Balance Modeling and Soil Water Content Monitoring**. 2017. p. 319. Tese (Doutorado em Engenharia Biológica) University of Nebraska, Lincoln, 2017.

BARSI, J. A.; BARKER, J. L.; SCHOTT, J. R. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument. Processdings of the 200 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS ’03. Melbourne, Australia, v. 5, n. 21-25, p. 3014-3016, 2003.

BARSI, J. A.; SCHOTT, J. R.; PALLUCONI, F. D.; HOOK, S. J. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. Processdings of the 200 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS ’03. Melbourne, Australia, v. 7, n. 28-29, p. 3014-3016, 2005.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F. ROENRINK, G. J. VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 212-213, [S.N.], p. 213-229, 1998.

BAUSCH, W. C., AND C. M. U. NEALE. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation - A concept. Transactions of the ASAE 30, v. 3, p. 703-709, 1987.

BRUNSELL, N. A.; GILLIES, R. R. Incorporating surface emissivity into a thermal atmospheric correction. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 68, n. 12, p. 1263-1269, 2002.

BOSQUILIA, R.; NEALE, C.; DUARTE, S.; LONGHI, S.; FERRAZ, S.; MULLER-KARGER, F.; MCCARTHY, M. Temporal evaluation of evapotranspiration for sugar cane, planted forest and native forest using Landsat 8 images and a two-source energy balance. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.L.], v. 6, n. 3, p.151, 2018.

BRUTSAERT, W. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications. Holland: D. Reidel Publishing Company, 1982.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. An Introduction to Environmental Biophysics (2 ed.). New York: **Springer**. 2012.

CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; ARKEBAUER, T. J.; SUYKER, A. E.; GONÇALVES, I. Z. Water productivity and crop yield: a simplified remote sensing driven operational

approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 249, [S.N.], p. 501-511, 2012.

CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; SUYKER, A.; ARKEBAUER, T. J.; GONÇALVES. Reflectance based crop coefficients REDUX: for operational evapotranspiration estimates in the age of high producing hybrid varieties. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 187, p. 140-153, 2017.

CAMPOS, I.; BALBONTÍN, C.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; GONZÁLEZ-DUGO, M. P.; NEALE, C. M. U.; CALERA, A. Combining a water balance model with evapotranspiration measurements to estimate total available soil water in irrigated and rainfed vineyards. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 165, [S.N.], p. 141-152, 2016.

CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; CALERA, A.; BALBONTIN, C.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (Vitis vinifera L.). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, [S.N.], p. 45-54, 2010.

COLAIZZI, P. D.; AGAM, N.; TOLK, J. A., EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; GOWDA, P. H.; ANDERSON, M. C. (2014). Two source energy balance model to calculate E, T, and ET: comparison of Priestley-Taylor and Penman Monteith formulations and two time scaling methods. Transactions of the ASABE, v. 57, n. 2, p. 479-498.

COLAIZZI, P. D.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; LI, F.; KUSTAS, W. P.; ANDERSON, M. C. Radiation Model for Row Crops: I. Geometric View Factors and Parameter Optimization. **Agronomy Journal***,* [S.L.], v. 104, n. 2, p. 225-240, 2012.

COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale: Erlbaum, 1988. 590 p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: Cana-de-açúcar. Safra 2018/2019. Terceiro levantamento, Brasília, p. 1-65, março 2019.

DANCEY, C.; REIDY, J. Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows. Porto Alegre: Artmed, 2006. 608 p.

FOSTER, T.; GONÇALVES, I. Z.; CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; BROZOVIĆ, N. Assessing landscape scale heterogeneity in irrigation water use with remote sensing and in situ monitoring. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v.14, n. 2, p. 40, 2019.

GELI, H. M. E.; NEALE, C. M. U. Spatial EvapoTranspiration Modelling Interface (SETMI). In Remote Sensing and Hydrology, editado por NEALE, C. M. U.; COSH, M. H. p. 171-174. Wallingford: Int Assoc Hydrological Sciences. 2012.

GONÇALVES, I. Z; MEKONNEN, M. M.; NEALE, C. M. U.; CAMPOS, I.; NEALE, M. R. Temporal and spatial variations of irrigation water use for commercial corn fields in

Central Nebraska, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 228, [S.N.], p. 105, 2020.

GONÇALVES., I. Z.; BARBOSA., E. A. A.; SANTOS, L. N. S.; NAZARIO, A. A.; FEITOSA, D. R. C.; TUTA, N. F., MATSURA., E. E. Nutritional balance and production of sugarcane irrigated with treated wastewater through subsurface drip. **Irrigation Science**, Berlin, v. 37, [S.N.], p. 207-217, 2019.

GONZÁLEZ-DUGO, M. P.; ESCUIN, S.; CANO, F.; CIFUENTES, V.; PADILLA, F. L. M., TIRADO, J. L.; OYONARTE, N., FERNÁNDEZ, P.; MATEOS, L. Monitoring evapotranspiration o irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images II. Application on basin scale. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 125, [S.N.], p. 92-104, 2013.

HOUBORG, R.; ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; WILSON, T.; MEYERS, T. Intercomparison of a 'bottom-up' and 'top-down' modeling paradigm for estimating carbon and energy fluxes over a variety of vegetative regimes across the U.S. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, n. 11, p. 1875-1895, 2009.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUNSAKER, D.J., PINTER, P.J., BARNES, E. M., KIMBALL, B. A. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. **Irrigation Science**, Berlin, v. 22, [S.N.], p. 95-104, 2003.

KLJUN, N., ROTACH, M. W., AND CALANCA, P.: A Simple Parameterisation for Flux Footprint Predictions, Bound.-Lay. **Meteorology**, [S.L.], v. 112, [S.N.], p. 503-523, 2004.

KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. **Agricultural and Forest Meteorology***,* Amsterdam, v. 94, n. 1, p. 13-29. 1999.

MAUDER, M.; FOKEN, T. Documentation and Instruction Manual of the Eddy Covariance Software Package TK2. Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, 2004, p.44.

MECIKALSKI, J. M., DIAK, G. R.; ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M. Estimating fluxes on continental scales using remotely sensed data in an atmosphere-land exchange model*.* **Journal of applied Meteorology***.* [S.L.], v. 38, [S.N.], p. 1352-1369, 1999.

MONCRIEFF, J.; CLEMENT, R.; FINNIGAN, J.; MEYERS, T. Averaging, Detrending, and Filtering of Eddy Covariance Time Series. In: LEE, X.; MASSMAN, W. (Ed.). **Handbook of Micrometeorology**: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis. Dordrecht: **Springer Netherlands**, 2004, p. 7-31.

MONCRIEFF, J. B.; MALHI, Y.; LEUNING, R. The propagation of errors in longterm measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water. **Global Change Biology**, Illinois, v. 2, n. 3, p. 231-240, 1996.

NEALE, C. M. U.; GELI, H. M. E.; KUSTAS, W. P.; ALFIERI, J. G.; GOWDA, P. H.; EVETT, S. R.; PRUEGER, J. H.; HIPPS, L. E.; DULANEY, W. P.; CHAVEZ, J. L.; FRENCH, A. N.; HOWELL, T. A. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach. **Advances in Water Resources**, [S.L.], v. 50, [S.N.], p. 152-161, 2012.

NEALE, C. M. U., BAUSCH, W. C., HEERMAN, D. F. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. Transactions of the ASAE, v. 32, [S.N.], p. 1891-1899, 1989.

NORMAN, J. M.; ANDERSON, M. C.; KUSTAS., W. P.; FRENCH, A. N.; MECIKALSKI, J.; TORN, R.; DIAK, G. R.; SCHMUGGE, T. J.; TANNER, B. C. W. Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions. **Water Resourse Research**, [S.L.], v. 39, [S.N.], p. 1221, 2003.

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface-temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 77, n. 3-4, p. 263-293, 1995.

SANTOS, H. G; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO A, J. C ; OLIVEIRA, J. B. DE; CUNHA, T. J. F. Brazilian agricultural research corporation. **Brazilian soil classification system**, 5 ed. Embrapa Soils, Brasília, p. 564, 2018.

TORRES, E. A.; CALERA, A. Bare soil evaporation under high evaporation demand: a proposed modification to the FAO-56 model. **Hydrology Science Journal**, [S.L.], v. 55, [S.N.], p. 303-315, 2010.

USDA-NRCS. 2004. Chapter 10, Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall *Part 630 Hydrology, National Engineering Handbook*. Washington, D. C.: U. S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Retrieved from https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch10.pdf.

VENANCIO, P. L.; MANTOVANI, C. E.; AMARAL, C. H DO.; NEALE, C. M. U.; GONÇALVES, I. Z.; FILGUEIRAS, R.; CAMPOS, I. Forecasting corn yield at the farm level in Brazil based on the FAO-66 approach and soil-adjusted vegetation index (SAVI), **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 225, [S.N.], p. 303-315, 2019.

VICKERS, D.; MAHRT, L. Quality Control and Flux Sampling Problems for Tower and Aircraft Data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Boston, v. 14, n. 3, p. 512-526, 1997.

WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, [S.L.], v. 106, n. 447, p. 85-100, 1980.

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal Irrigation Drainage**, [S.L.], v. 108, [S.N.], p. 57-74, 1982.

CAPÍTULO 3 - ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO O ALGORITMO SAFER

RESUMO: O objetivo do estudo foi estimar a evapotranspiração atual da cultura e coeficientes de cultura da cana-de-açúcar usando o modelo SAFER e comparar com dados obtidos através do sistema *Eddy Covariance (EC)*, a fim de validar e gerar indicadores que sejam base para a agricultura sustentável. O estudo foi realizado em área comercial, no município Andradina, São Paulo, compreendendo duas safras no período de 27 de junho de 2016 a 28 de junho de 2018 com a variedade RB96 - 6928. Na área foi instalado uma torre com o sistema *Eddy Covariance* para determinação da ETa e uma estação agrometeorológica forneceu os dados climáticos para o cálculo da evapotranspiração de referência (ETo). Os valores estimados da relação ET/ETo e ETa pelo método do SAFER apresentaram significante correlação com o àqueles do sistema EC, com R^2 médios de 0,70 e 0,80, respectivamente, porém apresentando subestimativas, evidenciando a necessidade de ajustes nas equações para a região de estudo, para garantia da estimativa precisa dos requerimentos hídricos da cultura.

Palavra-chaves: necessidade hídrica, sensoriamento remoto, irrigação

ABSTRACT: This study aimed to estimate actual crop evapotranspiration and sugarcane crop coefficients using the SAFER model and compare with data obtained through the Eddy Covariance (EC) system, in order to validate and generate indicators that are the basis for sustainable agriculture. The study was carried out in a commercial area, in the city of Andradina, São Paulo, in two harvests from June 2016 to June 2018 with the RB96 - 6928 variety. A tower with the Eddy Covariance system was installed to determine the ETa and an agrometeorological station provided the climatic data to calculated the reference evapotranspiration (ETo). The estimated values of the ET/ETo and ETa ratio by the SAFER method showed a significant correlation with those of the EC system, with average R^2 of 0.70 and 0.80, respectively, but with underestimates, evidencing the need for adjustments in the equations for this region, to ensure an accurate estimation of the crop water requirements.

Keywords: water need, remote sensing, irrigation

3.1 INTRODUÇÃO

O Brasil, na condição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, visa para o segmento crescente expressão para o agronegócio brasileiro. O aumento no requerimento mundial por etanol, aliado às grandes áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis à cultura, tornam o país um participante na comercialização mundial com elevada competitividade.

Nesse cenário, o estado de São Paulo se destaca como maior produtor nacional, alcançando uma produção de cana-de-açúcar de 332,9 milhões de toneladas na safra 2018/19. a produtividade da cultura no Brasil está em torno de 75 ton ha^{-1}, muito abaixo daquelas para áreas irrigadas devido principalmente ao estresse hídrico em fases fenológicas críticas (CONAB, 2019).

A irrigação em cana-de-açúcar é de suma importância uma vez que traz diversos benefícios para o desenvolvimento da cultura com a racionalização da prática, podendo-se destacar o aumento significativo da produtividade em relação às condições de sequeiro, a diminuição da pressão sobre a abertura de novas áreas de cultivo, a otimização do uso do solo e de insumos (implementos, máquinas, mão-de-obra etc.), o aumento e a consistência na oferta dos produtos obtidos, o estímulo à implantação de agroindústrias e a minimização de riscos climáticos (ANA, 2018).

Entretanto, se o manejo da irrigação for mal realizado, este pode promover condições de excesso hídrico para a cultura da cana-de-açúcar, acarretando em desperdício dos recursos hídricos e desequilíbrios ambientais, podendo também interferir em outras práticas de manejo da cultura e da mesma forma, aplicações de água aquém das necessidades hídricas da cultura compromete o seu potencial produtivo, sendo então necessária a quantificação da evapotranspiração atual (ETa), indispensável para o correto manejo de água em cultivo irrigado, pois esta representa o consumo hídrico das plantas, e seu conhecimento evita desperdício de água e energia, e perdas de produtividade potencial.

O uso combinado de técnicas de sensoriamento remoto com estações agrometeorológicas possibilita avaliar e obter dados de ETa que podem auxiliar no manejo da irrigação e diagnosticar a o quanto de água foi consumida pela cultura.

O SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) é um algoritmo de uso conjunto de parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e dados agrometeorológicos para obtenção ETa, que tem se destacado em trabalhos

realizados no Brasil, por apresentar bons resultados em larga escala (TEIXEIRA et al., 2013). Ele tem como vantagem a não utilização de classificação das culturas nem de identificação das condições hídricas extremas, podendo-se serem feitas análises de tendências históricas (TEIXEIRA, 2012).

O objetivo do estudo foi estimar a ETa e a relação entre esta e a evapotranspiração de referência (ETa/ETo) ao longo de duas safras de cana-de-açúcar usando o modelo SAFER e comparar com medições realizadas pelo sistema das correlações turbulentas (*Eddy Covariance* - EC), a fim de validar e gerar indicadores que sejam base para o manejo racional de irrigação na cultura.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Descrição da área de estudo

A pesquisa foi realizada em uma área comercial de 23,6 hectares no município de Andradina, Estado de São Paulo, Latitude 20° 43' 43,6" Sul, Longitude 51º 16' 30,3" Oeste e 360 metros de altitude - Figura 1 -, cultivada com cana-de-açúcar no quarto e quinto corte, no período de 27 de junho de 2016 a 28 de junho de 2018 com a variedade RB96 - 6928.

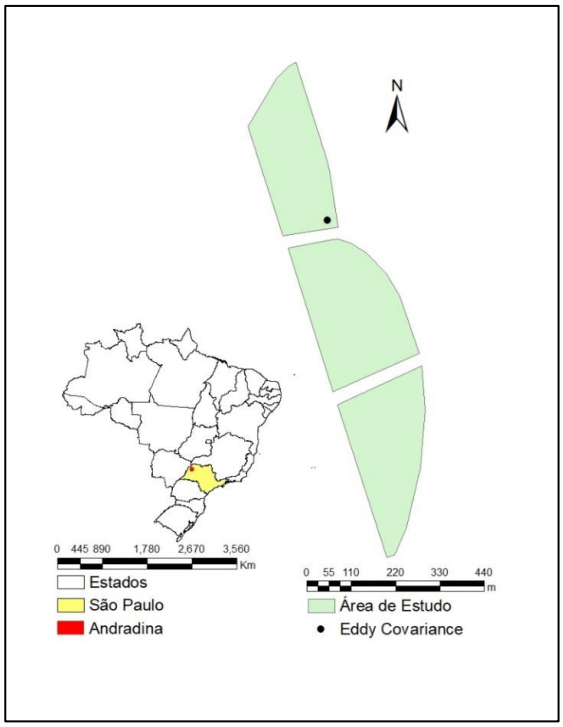

Figura 1. Localização da área de estudo.

O clima da região segundo a classificação de Koppen é do tipo tropical com inverno seco (Aw) (PEEL et al., 2007) com precipitação anual média 1242 mm, evapotranspiração de referência média anual 1536 mm, radiação solar média de 17,2 MJ m^{-2} dia^{-1}, temperatura do ar entre de 19,7 a 26,9ºC e umidade relativa média do ar é de 62,4% (UNESP, 2019). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico (SANTOS et al., 2018).

Os dados climáticos utilizados foram da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (http://clima.feis.unesp.br) onde a evapotranspiração de referência (ETo) é estimada pela equação de Penman-Monteith (ALLEN at al., 1998).

A cultura foi instalada em 15 de setembro de 2013 (cana planta) com espaçamento de 0,9 m entre linhas simples e 1,5 m entre linhas duplas. A irrigação foi realizada através de um sistema de gotejamento subsuperficial enterrados a 0,40 m de profundidade com vazão do emissor de 1 $L.hora^{-1}$.

3.2.2 Método das correlações turbulentas - *Eddy Covariance* (EC)

No campo foi instalada uma torre equipada com sensores para medir os elementos micrometeorológicos e os componentes do balanço de energia, visando-

se comparar os resultados medidos em campo com os estimados com imagens de satélites pelo modelo SAFER. Para a obtenção dos componentes dos fluxos de calor latente (λE) e sensível (H) foi instalado um sistema das correlações turbulentas (*Eddy Covariance* - EC), com medidas em alta frequência, enquanto que os sensores micrometeorológicos adicionais realizaram medições de baixa frequência.

A torre era constituída por um anemômetro sônico tridimensional e um analisador de gás (CO_2 e H_2O) IRGASON (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA), posicionados considerando a direção do vento predominante, com um registrador de dados (CR3000, Campbell Scientific Instruments, Utah, EUA) para registrar dados brutos a 10 Hz (10 dados por segundo) de medidas, fixado a 8,0 m de altura.

As variáveis micrometeorológicas que foram medidas acima do dossel: todos os componentes do balanço de radiação - radiação solar incidente e refletida; radiação emitida pela superfície e atmosfera (CNR4, Net radiometer - Kipp & Zonen B.V., Delft, Holanda); e precipitação (CS700-L, Hydrological Services Pty. Ltd., Sidney, Austrália), esses equipamentos foram fixados 5,0 m de altura.

No solo foram instalados fluximetros para mensurar o fluxo de calor no solo (HFP01-L, Campbell Scientific, Inc. Logan, Utah, EUA) a 40 cm de profundidade. Os dados de baixa frequência foram coletados continuamente em intervalos de 5 segundos com médias ou totalizações de 30 minutos.

Os dados brutos de EC (10 Hz) foram processados utilizando software *Eddy Pro Advanced* (V 3.0 e 4.0 - LI-COR, Lincoln, NE, EUA). Foi utilizado as configurações padrões do software para verificações de séries temporais (VICKERS E MAHRT, 1997), filtros de baixa e alta frequência (MONCRIEFF et al., 1997, 2004), flutuações de densidade (WEBB et al., 1980), correção de inclinação do anemômetro com rotação dupla (WILCZAK et al., 2001), minimização do atraso usando covariância máxima com padrão defasagem de zero e cálculo da detecção do limiar (u*) usando ambos ao longo e cisalhamento transversal do vento. *Footprint* foram calculados seguindo Kljun et al. (2004) e bandeiras de qualidade determinadas por Mauder e Foken (2004). Os dados após o processamento foram dispostos em médias de 30 minutos.

Para o preenchimento de falhas e particionamento de fluxo foi utilizado o software TOVI (V 3.0 e 4.0 - LI-COR, Lincoln, NE, EUA).

Os dados de fluxos obtidos, resultou em um fechamento geral do balanço de energia de cerca de 75,5%. Em alguns casos, isso permite uma quantidade

considerável de energia não contabilizada na partição da energia disponível (Rn - G) em latentes e λE, que poderiam causar discrepâncias significativas nas comparações com fluxos de calor detectados remotamente. O erro inerente na medição de H, λE, R_n e G, por medições em campo, são reportados como 15% a 20%, 15% a 20%, 5% a 10%, 20% a 30%, respectivamente, de acordo com Weaver (1990), Field et al. (1994). Por esse motivo, a razão de Bowen medida na torre de fluxo foi usada para ajustar os fluxos medidos e forçar o fechamento seguindo o procedimento sugerido por Twine et al. (2000) descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Procedimento de ajuste do fechamento do balanço de energia do sistema de correlações turbulentas.

$$\boldsymbol{\beta = Razão\ de\ Bowen = H/LE}$$

$$\boldsymbol{\Delta LE = \{(R_n - G) - [(1+\beta) * LE]\}/(1+\beta)}$$

$$\boldsymbol{\Delta H = [\beta * (LE + \Delta LE) - H]}$$

$$\boldsymbol{*LE_{ff} = LE\ (mensurada) + \Delta LE}$$

$$\boldsymbol{*H_{ff} = H\ (mensurada) + \Delta H}$$

$$\boldsymbol{(R_n - G) = (H + \Delta H) + (LE + (\Delta LE)}$$

*LE_{ff} fluxo de calor latente forçando o fechamento e H_{ff} fluxo de calor sensível forçando o fechamento.

Os valores de λE que representa a energia por unidade de área e por unidade de tempo, foram convertidos em unidade de lâmina evaporada e, ou, transpirada em um dado intervalo de tempo, ou seja, a ETa. Com base na razão entre os valores de ETa e ETo foi determinado ETa/ETo, sendo este adimensional.

3.2.3 *Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration* - SAFER

Foram coletada imagens do satélite Landsat 8, em órbitas 222, 223 e ponto 74, durante as duas safras estudadas de forma gratuita no sítio do U.S Geological Survey (https://earthexplorer.usgs.gov).

Após a obtenção das imagens, essas foram importadas para o software Ilwis Academic 3.3 e aplicado o modelo SAFER, onde foram obtidos os valores médios dos parâmetros biofísicos que compõem a evapotranspiração atual (ETa SAFER) e a relação ETa/ETo.

Para estimativa da ETa via sensoriamento remoto as imagens foram processadas, com correções geométricas, calibrações radiométricas e informações biofísicas.

Para converter os valores de números digitais do sensor LANDSAT 8 OLI para radiância e reflectância espectral, utilizou-se coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens (CHANDER; MARKHAM, 2003) para cada banda por meio da seguinte equação:

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255}\right) Q_{cal} + Q_{min} \quad (01)$$

Em que, L_{MAX} é radiância máxima ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$); L_{MIN} é radiância mínima ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$); Q_{cal} é intensidade do pixel (ND), número inteiro variando de 0 a 255.

A partir dos valores de radiância, foi calculada então a reflectância (pλ) para cada banda:

$$p_\lambda = \frac{\pi \times L_\lambda}{ESUN_\lambda \times cosZ \times E_0} \quad (02)$$

Em que, L_λ é radiância de cada banda; $ESUN_\lambda$ é irradiância espectral no topo da atmosfera (Tabela 2); cosZ o ângulo zenital; E_0 é a razão das distancias Terra-Sol (real e média), que é obtida a partir da seguinte equação:

$$E_0 = 1{,}000110 + 0{,}034221\cos(da) + 0{,}001280(da) + 0{,}000719\cos(2 \times da) + 0{,}00077\sin(2 \times \mathrm{da}) \quad (03)$$

Em que, da é calculado como a equação a seguir:

$$da = (d_n - 1)\frac{2\pi}{365} \quad (04)$$

em que dn é o dia Juliano da imagem.

Tabela 2. Descrição das bandas do Landsat 8, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração para albedo e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).

Bandas	Comprimento de onda (μm^{-1})	Coeficientes de calibração - ωλ ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)	Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera - $ESUN_\lambda$ ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)
Banda 1 - Coastal aerosol	0,43 - 0,45	-	1895,60
Banda 2 - Azul	0,45 - 0,51	0,301	2004,60
Banda 3 - Verde	0,53 - 0,56	0,273	1820,70
Banda 4 - Vermelho (V)	0,64 - 0,67	0,233	1549,40
Banda 5 - Infravermelho Próximo (IVP)	0,85 - 0,88	0,143	951,20
Banda 6 - Infravermelho médio 1	1,57 - 1,65	0,037	247,60
Banda 7 - Infravermelho médio 2	2,11 - 2,29	0,013	85,50

Fonte: Van Hellemont & Ruddick (2014)

A obtenção do albedo no topo da atmosfera foi a partir da equação 5, descrita abaixo:

$$\alpha_{top} = \sum(\omega_\lambda \times \rho_\lambda) \quad (05)$$

Em que, ρ_λ é reflectância para cada banda; ω_λ o coeficiente de calibração para cada banda

ω_λ foi obtido conforme a Equação 6:

$$\omega_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \quad (06)$$

Para o cálculo do algoritmo SAFER, o albedo de superfície (α_0) foi estimado a partir de α_{top} representado a seguir:

$$\alpha_0 = a \times \alpha_{top} + b \quad (07)$$

Em que, “a” e “b” são coeficientes de regressão proposto por Teixeira (2010), que apresentam os valores, respectivamente, de 0,7 e 0,006.

Para o cálculo de temperatura da superfície (To), utilizou-se as imagens do infravermelho termal das bandas 10 (faixa espectral de 10,6 a 11,19 µm) e 11 (faixa espectral de 11,5 a 12,51 µm) do sensor TM do satélite Landsat - 8, com resolução espacial de 100 metros. A temperatura de superfície (To) foi calculada conforme a Equação 8:

$$T_0 = 1{,}11 \times T_{brigth} - 31{,}89 \quad (08)$$

em que Temperatura de brilho (T_{bright}) obtido pela Equação 9:

$$T_{bright} = \frac{1260{,}56}{\ln\left(\frac{607{,}76}{L_{termal}+1}\right)} \quad (09)$$

Em que L_{termal} é radiância (L_λ) das bandas 10 (faixa espectral de 10,6 a 11,19 µm) e 11 (faixa espectral de 11,5 a 12,51 µm), com resolução espacial de 100 metros.

Para a estimativa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi feito de acordo com Equação 10, representada a seguir:

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

Em que IVP é a reflectância da banda do infravermelho próximo e V a reflectância na banda do vermelho.

A partir, dos dados de α0, T0 e NDVI foi possível calcular os valores da relação ETa/ETo pela Equação 11:

$$\frac{ETa}{ETo} = exp\left[a + b\left(\frac{T_0}{\alpha_0 \times NDVI}\right)\right] \quad (11)$$

O coeficiente “a” foi utilizado o valor de 1,0 (HERNANDEZ et al., 2012; TEIXEIRA et al., 2013) determinado para o Noroeste Paulista. O coeficiente “b” foi obtido por Teixeira (2010) e corresponde ao valor de -0,008.

Em seguida os valores da relação (ETa/ETo) foram multiplicados pelos valores diários da ETo é a evapotranspiração de referência, dada em milímetros por dia (mm d $^{-1}$), que foi utilizado uma interpolação das evapotranspirações das 8 estações no Noroeste Paulista, chegando assim à evapotranspiração atual (ETa), conforme a equação 12:

$$ET_a = \frac{ET_a}{ETo} \times ETo \quad (12)$$

3.2.4 Análise dos Dados

Foi utilizado o software ArcGis 10.0 para extração dos dados e o Microsoft Excel para compilação destes, construção de gráficos e análise de regressão linear em que se consideraram os indicadores estatísticos, R-quadrado e coeficiente de correlação simples de Pearson “r”.

O R-quadrado é uma das formas de avaliar a qualidade do ajuste do modelo utilizado. Os valores podem variar de 0 a 1, os valores mais elevados de R-quadrado estão associados a baixas variâncias de erros, ou seja, quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade do ajuste e mais explicativo é o modelo (LEGATES; MCCABE JR., 1999; MORIASI et al., 2007; PISANI JUNIOR et al., 2018).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{(O_i - O)^2} \quad (13)$$

Em que O_i valor observado (ETa *Eddy Covariance*), mm; E_i é o valor estimado (ETa obtida pelo SAFER), mm; O é a média dos valores observados, mm.

O r de Pearson, mede o nível da correlação linear entre duas variáveis. Quando o r for igual a 1, há uma correlação positiva perfeita entre as duas variáveis; se r for igual a -1, obtém-se uma correlação negativa perfeita, indicando que as variáveis são opostas. Enquanto variáveis correlacionadas perfeitamente positivas (r igual 1), elas devem encontra-se em na mesma direção. Contudo, quando o resultado final alcançado for igual a 0, as duas variáveis não são dependentes linearmente uma da outra, podendo existir uma outra dependência que seja não linear (LEGATES; MCCABE JR., 1999; MORIASI et al., 2007; PISANI JUNIOR et al., 2018).

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{(O_i - O)^2}} \quad (14)$$

Em que O_i valor observado (ETa *Eddy Covariance*), mm; E_i é o valor estimado (ETa obtida pelo SAFER), mm; O é a média dos valores observados, mm.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizado o comparativo dos valores de ETa estimados a partir do algoritmo SAFER com aqueles resultantes de medições do sistema *Eddy Covariance*. A regressão utilizada foi a linear (Figuras 2a e 2b), onde para as duas safras o R^2 apresentaram valores superiores a 0,60 a correlação de Pearson "r" apresentou um valor de r igual a 0,79 no para o quarto corte e 0,81 para o quinto corte. Alguns pesquisadores classificam valores de r igual a 0,10 até 0,30 (fraco); de 0,40 até 0,6 (moderado) e 0,70 até 1 (forte). Desta forma, as correções apresentaram um forte ajuste.

Ainda nas Figuras 2a e 2b, observa-se que a uma subestimativa do modelo SAFER quando comparado com o EC. De acordo com Sales et al. (2018), o problema do SAFER na subestimativa se deve ao momento onde se à presença de solos com pouca vegetação, resultando em baixos valores de NDVI e altos valores de temperatura de superfície, levando a baixos valores de R^2 e r, consequentemente, baixos valores de ETa. Porém, deve-se considerar que o uso do coeficiente "b" = 1 (equação 11), talvez não seja o valor regional apropriado. Oliveira et. al., (2019), aplicando o SAFER no noroeste paulista com a cultura da cana-de-açúcar encontrou valores de ETa similares ao do trabalho corrente, assim como Bispo et. al., (2019), comparando a estimativa da ETa através do algoritmo com o método padrão da FAO 56 (ALLEN et. al., 1998), na mesma região, observaram que subestimativa da ETa a partir do SAFER no ciclo do milho.

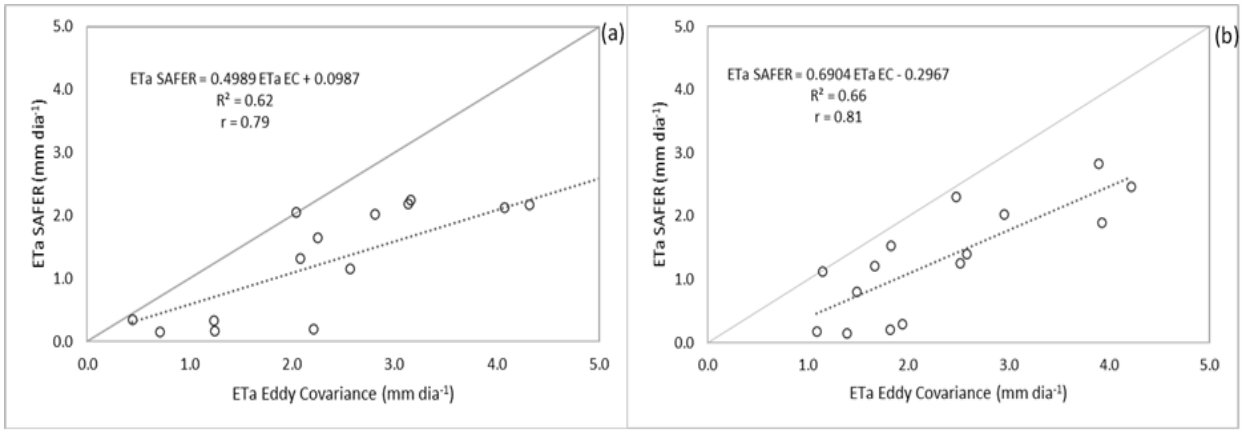

Figura 2. Comparativo dos valores de ET determinada pelo sistema *Eddy Covariance*, com aqueles estimados com aplicação do algoritmo SAFER na cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte.

Já para Ramos et al. (2018) em pesquisa, realizada no Vale do São Francisco, comparando a ETa obtida pelo SAFER com a determinada em campo, a partir de torres micrometeorológicas utilizando a metodologia de Razão de Bowen, observaram correlação linear significativa ao nível de 5% de probabilidade por R^2 igual 0,90. Também no Vale do São Francisco, avaliando o bioma Caatinga, Miranda et al. (2017), obtiveram boa correlação entre a ETa SAFER e ETa EC em escala diária R^2 de 0,85.

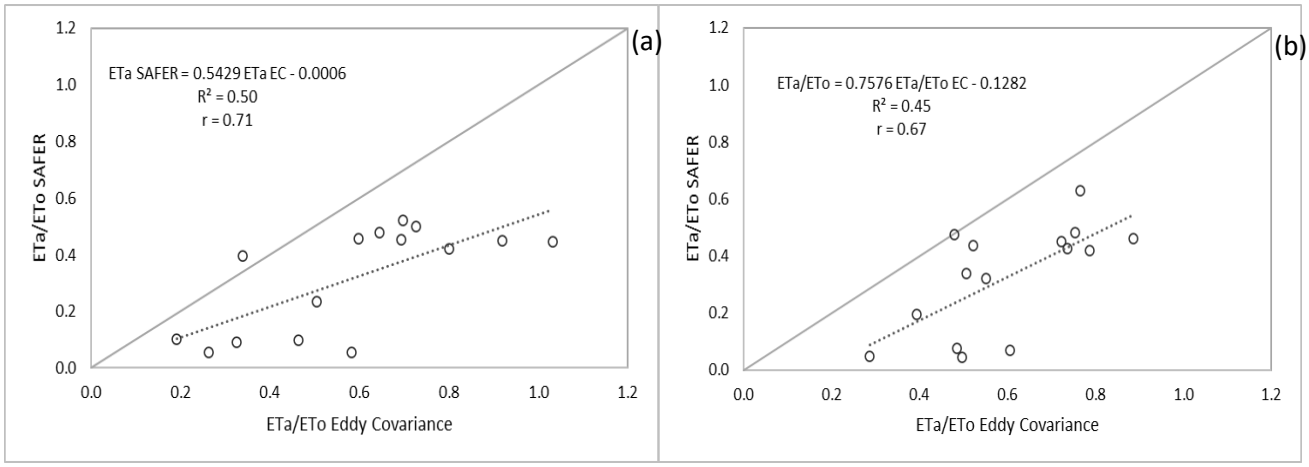

Figura 3. Comparativo dos valores de ETa/ETo obtidos pelo sistema *Eddy Covariance* e estação agrometeorológica, com aqueles modelados com aplicação do algoritmo SAFER na cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte.

Nas Figuras 3a e 3b são apresentadas as correlações dos valores da razão ETa/ETo modelados pelo SAFER com aqueles medidos em campo, assim como para ETa os valores desta razão também foram subestimados com o modelo SAFER, com

valor de R^2 de 0,50 e 0,45, no quarto e quinto corte, respectivamente. E os valores da correlação de Pearson “r” em média foi de 0,70, ainda assim considerando uma forte correlação.

Fontes et. al. (2019), avaliando a relação ETa/ETo obtida pelo algoritmo SAFER na cultura do milho, comparado com o Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998) e método de Graus-Dia acumulados (TEIXEIRA et al., 2014), encontraram valores inferiores aos obtidos com estas duas últimas metodologias, ainda segundo o autor isso pode ser ocasionado devido ao manejo imposto a cultura como as condições hídricas, condições de solo, nutrição da planta e desuniformidade do sistema de irrigação. Para Sales et. al. (2018), avaliando coeficientes de cultura obtidos pelo SAFER, associados com os valores de ETa/ETo recomendados pela Embrapa para cultura do tomate, observaram que houve um bom ajuste para os resultados das variáveis analisadas, evidenciando forte relação entre as metodologias analisados.

A subestimativa encontrada no trabalho pode ser devido as condições climáticas ou também resposta da cultura, evidenciando a necessidade de estudos para calibração realizando ajustes dos coeficientes regionais algoritmo SAFER. Contudo o algoritmo tem se mostrando uma ferramenta útil para estimativa do consumo hídrico das culturas.

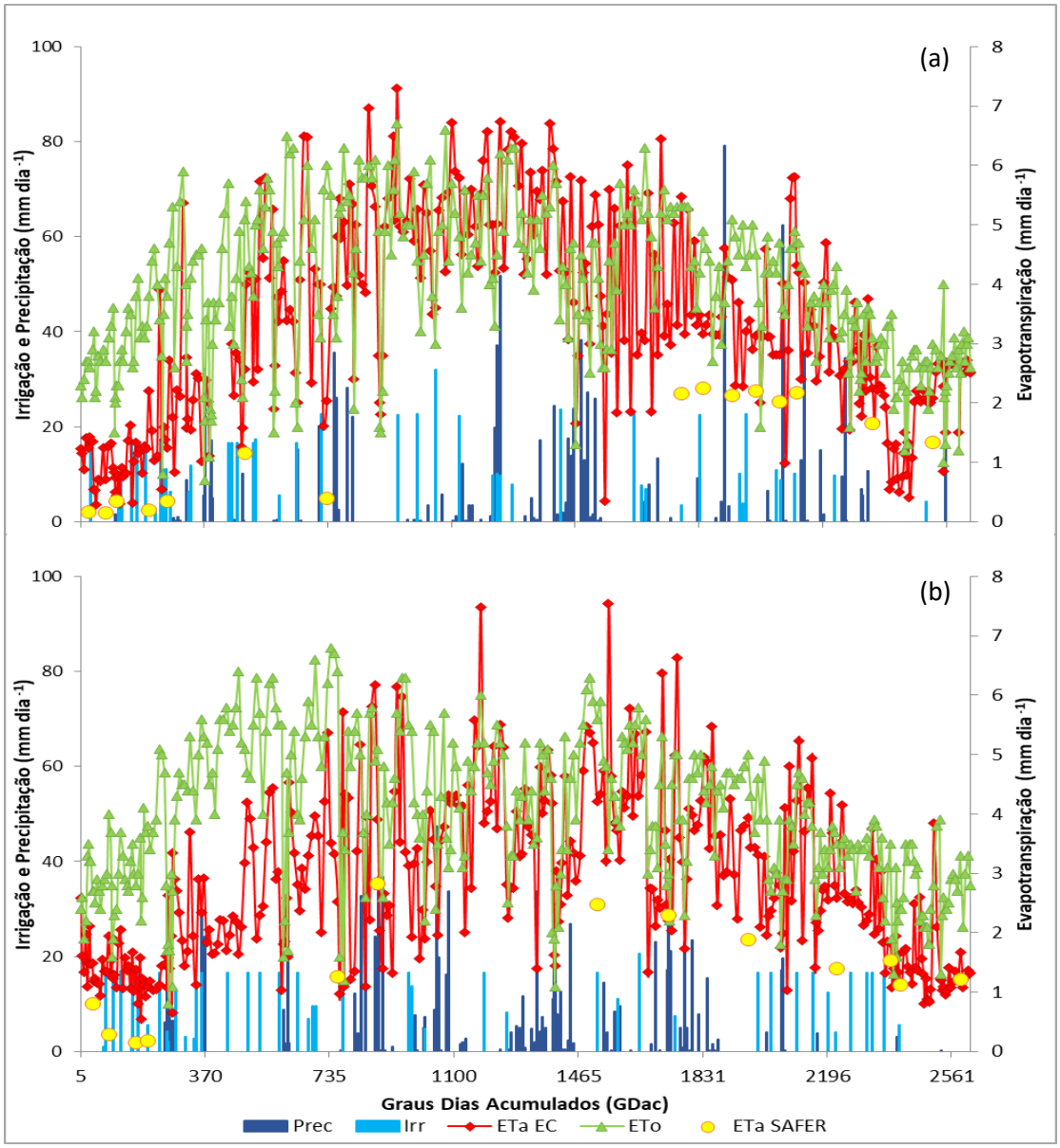

Figura 4. Evolução da evapotranspiração atual (ETa) obtida pelo sistema *Eddy Covariance*, e aquela estimada com utilização do algoritmo SAFER, juntamente com a evapotranspiração de referência (ETo), precipitação e irrigação na cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte

Nas Figuras 4a e 4b são apresentados a evolução da ETo e da ETa estimada pelo algoritmo SAFER e pela medida pelo sistema EC, bem como dados de precipitação e irrigação.

A ETa média diária estimada a partir do SAFER foi de 1,4 mm dia^{-1} no quarto corte e 1,3 mm no quinto corte, os valores máximo e mínimo foram de 0,15 e 2,25 mm dia^{-1} e 0,15 e 2,47 mm dia^{-1}, respectivamente para os dois períodos. Silva et al. (2019), em estudo realizado na região centro-oeste do estado de São Paulo, encontraram maiores ETa em áreas destinadas a silvicultura e cana-de-açúcar, segundo os autores devido as variações nos estágios de crescimento.

Os valores mínimos de ETa foram no início da safra onde o solo encontrava exposto. De acordo com Santos (2016) os valores da temperatura do solo (Ts) foram maiores, com o solo em grande parte exposto, sem vegetação para interceptar a radiação solar. Gomes et al. (2013) e Tartari et al. (2015) encontraram Ts menores em áreas com alta densidade vegetal e valores elevados da Ts em áreas com baixos índices de vegetação em cultivos de cana-de-açúcar. Sendo assim, a ocorrência de uma maior Ts interfere em uma maior taxa de evapotranspiração.

Os valores médios de ETa encontrados no atual trabalho são similares ao encontrado por Teixeira et al. (2015), que aplicaram o algoritmo SAFER na determinação da ETa em condições de sazonalidade climática da região Norte do Estado de São Paulo, encontraram valores máximo para cana-de-açúcar na dia juliano 171 de 1,93 mm d^{-1} e média de 1,03 mm d^{-1} e em 151 DJ, valor máximo de 1,33 mm d^{-1} e média de 0,59 mm d^{-1}.

São apresentados nas Figuras 5a e 5b a evolução dos valores da razão ETa/ETo obtida com medições do EC e estação agrometeorológica, e os estimados pelo SAFER, juntamente com a precipitação e irrigação para as duas safras.

Observa-se que a relação ETa/ETo estimada pelo algoritmo SAFER encontra-se abaixo dos valores obtidos pelas medições em campo, contudo os valores seguem padrão semelhante. Os maiores valores encontrados pelo SAFER para ETa/ETo foram 0,52 e 0,68, devendo-se salientar que nem todas as imagens foram possíveis serem utilizadas devido a presença de nuvens sobre a área experimental.

Teixeira et. al. (2016) em estudo sob condições de sequeiro na região Norte do Estado de São Paulo ao aplicar o algoritmo SAFER, encontraram valores de Kc da cana-de-açúcar, cobrindo totalmente o solo e sem nenhuma restrição hídrica, em torno de 1,25, valor esse proposto por Allen et al. (1998), com valor limite. Contudo o coeficiente “a” utilizado pelos autores foi de 1,8, enquanto neste estudo foi de 1,0 de acordo com trabalhos na região realizados por Hernandez et al. (2012).

Para Eksteen et al. (2014), em estudo sobre as relações hídricas de genótipos de cana-de-açúcar os valores de ETa/ETo variaram entre 1,1 e 1,5, dependendo das condições climáticas. Os valores da relação ETa/ETo abaixo dos encontrados no presente estudo, reforçam a necessidade de calibração do modelo SAFER, entretanto este tem se mostrado satisfatório para avaliação e planejamento hídrico em áreas agrícolas irrigadas.

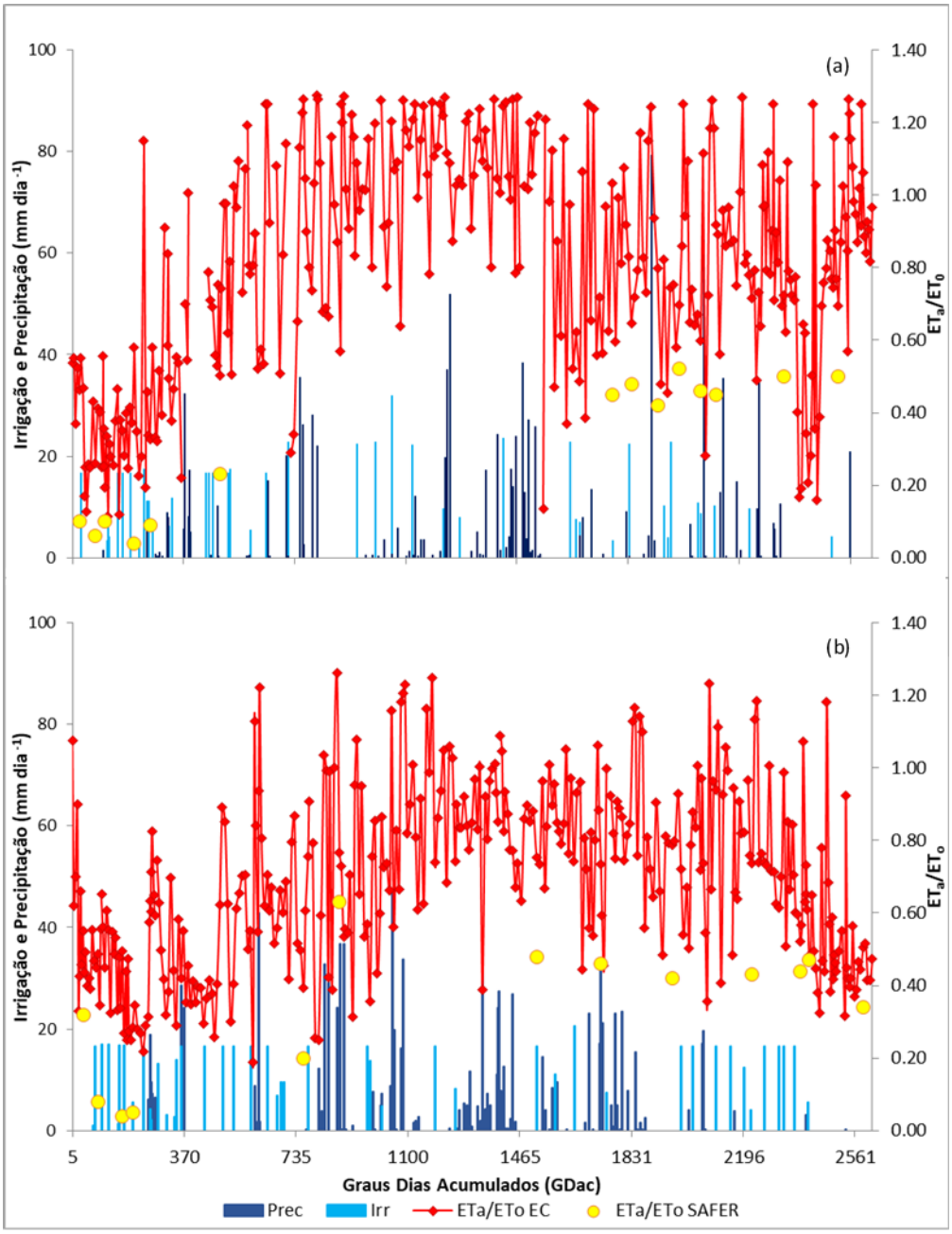

Figura 5. Evolução dos valores de ETa/ETo obtidos *Eddy Covariance* e estação agrometeorógicas, e aqueles modelados pelo algoritmo SAFER, juntamente com precipitação e irrigação na cana-de-açúcar. (a) Quarto corte, (b) Quinto corte.

3.4 CONCLUSÃO

Os valores de ETa e da relação ETa/ETo obtidas pelo método SAFER durante do ciclo da cana-de-açúcar foram menores que aqueles obtidos pelo sistema *Eddy Covariance* e estação agrometeorológica, evidenciando a necessidade de calibrações

para a região e para que possa ser realizado gerenciamento correto da irrigação para cultura afim de realizar o manejo adequado da água.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, Italy, p. 297, 1998.

BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; TRINCA, V. F. Uso do algoritmo SAFER para estimativa da evapotranspiração atual da cultura do milho. In: Inovagri International Meeting, 5; CONIRD - Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 28; SLAS - Simpósio Latino Americano de Salinidade, 1., 2019, **Anais...** Fortaleza, 2019.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro - Cana-de-açúcar - Safra 2018/2019. Quarto levantamento, maio de 2019 - safra 2018/2019: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2019.

EKSTEEN, A.; SINGELS, A.; NGXALIWE, S. “Water relations of two contrasting sugarcane genotypes.” **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 168, [S.N.], p. 86-100, 2014.

FONTES, P. H. V. C. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; OLIVEIRA, D. A.; NUNES, M. F. Aplicação do Algoritmo SAFER em Áreas comerciais de Milho Irrigado por Pivô Central na Região Noroeste Paulista. In: Inovagri International Meeting, 5; CONIRD - Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 28; SLAS - Simpósio Latino Americano de Salinidade, 1., 2019, **Anais...** Fortaleza, 2019.

GOMES, L. C. F., SANTOS, C. A. C., ALMEIDA, H. A. Balanço de energia à superfície para a cidade de Patos-PB usando técnicas de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 1, [S.N.], p. 15-28, 2013.

HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C.; TAGHVAEIAN, S. Determining large scale actual evapotranspiration using agro-meteorological and remote sensing data in the northwest of São Paulo State, Brazil. **Acta Horticulturae**, Korbeek-Lo, n. 1038, p. 263- 270, 2014.

HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C.; TAGHVAEIAN, S. TEIXEIRA, A. H. C. Avaliação preliminar do modelo SEBAL para a estimativa da distribuição espacial da evapotranspiração em áreas irrigadas no noroeste paulista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15, 2011, Curitiba. **Anais**... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. Curitiba: INPE, p. 5209 - 5216, 2011.

KLJUN, N.; ROTACH, M. W.; CALANCA, P. A Simple Parameterisation for Flux Footprint Predictions, Bound-Lay. **Meteorology**, [S.L.], v. 112, [S.N.], p. 503-523, 2004.

LEGATES, D. R.; MCCABE JR., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

MAUDER, M.; FOKEN, T. Documentation and Instruction Manual of the Eddy Covariance Software Package TK2. Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, 2004, p. 44.

MIRANDA, R. D. Q.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B.; JONES, C. A.; SRINIVASAN, R. Reliability of MODIS evapotranspiration products for heterogeneous dry forest: a study case of Caatinga. **Advances in Meteorology**, [S.L.], v. 2017, n. 14, p. 1-14, 2017.

MONCRIEFF, J.; CLEMENT, R.; FINNIGAN, J.; MEYERS, T. Averaging, Detrending, and Filtering of Eddy Covariance Time Series. In: LEE, X.; MASSMAN, W. (Ed.). **Handbook of Micrometeorology**: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis. Dordrecht: **Springer Netherlands**, p. 7-31, 2004.

MONCRIEFF, J. B.; MALHI, Y.; LEUNING, R. The propagation of errors in longterm measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water. **Global Change Biology**, Illinois, v. 2, n. 3, p. 231-240, 1996.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. V.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic Quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Michigan, v. 50, n. 3, p. 885-890, 2007.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. H. B.; BISPO, R. C. B.; TEIXEIRA, A. H. C. Aplicação do algoritmo SAFER para determinação da evapotranspiração em canaviais irrigados por diferentes sistemas. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, IRRIGA & INOVAGRI, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2019.

PISANI JR, R.; CASTRO, M. C. A. A.; COSTA, A. Á. Desenvolvimento de correlação para estimativa da taxa de geração per capita de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo: influências da população, renda per capita e consumo de energia elétrica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 415-424, 2018.

RAMOS, R. R. D. **Aplicação do Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (SAFER) para a cana-de-açúcar no submédio do Vale do São Francisco Brasil**. 2018. 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2018

SALES, D. L.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; SOUZA, J. M. F. Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial utilizando o algoritmo SAFER**. Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 3, p. 629-640, 2018.

SANTOS, J. E. O. **Evapotranspiração da cana-de-açúcar obtida por sensoriamento remoto no município de Botucatu-SP**. 2016. 76 p. Dissertação

(Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Combining remotely sensed actual evapotranspiration and GIS analysis for groundwater level modeling. **Environmental Earth Sciences**, [S.L.], v. 78, n. 1, p. 462-478, 2019.

TARTARI, R., MACHADO, N. G., ANJOS, M. R., CUNHA J. M., MUSIS, C. R., Nogueira, J. S., BIUDES, M. S. Análise de índices biofísicos a partir de imagens TM Landsat 5 em paisagem heterogênea no Sudoeste da Amazônia. **Revista Ambiente Água**, Taubaté, v.10, [S.N.], p. 943-953, 2015.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; BOLFE, L. E. Irrigation performance assessments for corn crop whith landsat imagens in the São Paulo State, Brazil. **Water Resources and Irrigation Management**, Cruz das Almas, v. 3, n. 2, p. 91-100, 2014.

TEIXEIRA, A. H. C., HERNANDEZ, F. B. T.; MORRIS, H. L. L.; SCHERER, W.; BASSOI, L. H. Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido Brasileiro. 1. ed. Campinas-SP, 2013.

TEIXEIRA, A. H. C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agrometeorological stations. In: NEALE, C. M. U.; COSH, M. H. (Ed.). **Remote Sensing and Hydrology**. Wallingford, v. 352, [S.N.], p. 154-157, 2012.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith Equation. **Remote Sensing**, Basel, v.2, n.5, p.1287-1319, 2010.

VICKERS, D.; MAHRT, L. Quality Control and Flux Sampling Problems for Tower and Aircraft Data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Boston, v. 14, n. 3, p. 512-526, 1997.

WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Malden, v. 106, n. 447, p. 85-100, 1980.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para realizar o adequado manejo de irrigação é fundamental contar com um projeto que atenda as demandas hídricas da cultura de interesse, estimada a evapotranspiração com precisão por técnicas e coeficientes, que devem ser determinados em pesquisas aplicadas.

Os modelos baseados no sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração e dos coeficientes de cultura, como o SAFER e SETMI, combinados com variáveis agrometeorológicas podem ser práticos e eficazes para analises e tomadas de decisões relacionada ao uso da água, podendo ser feito em larga escala, contudo, métodos micrometeorológicos viabilizam a validação destes modelos de estimativa, de modo à determinar com maior precisão, o consumo total de água pelas culturas em diferentes escalas.

Esta pesquisa ainda mostra a importância de se monitorar a irrigação em áreas comerciais para que se possa ter uma resposta de quais parâmetros que podem melhorar as condições da cultura em campo.

Atualmente, com a revolução tecnológica no campo, obtenção de dados em tempo real, monitoramento de áreas, uso de tecnologias se faz necessário para melhoria das atividades no campo, levando ganho de produtividade, melhor qualidade e lucro aos produtores.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, Italy, p. 297, 1998.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S.L.], v.133, n. 4, p. 380-394, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Levantamento da cana-de-açúcar irrigada na região Centro-Sul do Brasil. Brasília, DF: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, 2017. 31 p.

ARIZA, A. Descripción y corrección de productos landsat 8 - ldcm (landsat data continuity mission). Bogota: IGAC, v. 1, n. 46, 2013.

AVILEZ, A. M. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; GIOVANELLI, L. B. Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. **Irriga,** Botucatu, Edição Especial 30 anos PG Irriga, v. 1, n. 1, p. 171-188, 2018.

BARR, A. G.; MORGENSTERN, K.; BLACK, T. A.; MCCAUGHEY, J. H.; NESIC, Z. Surface energy balance closure by the eddy-covariance method above three boreal forest stands and implications for the measurement of the CO2 flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 140, n. 1-4, p. 322-337, 2006.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, J. H.; WANG, Y. M. A; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 212-213, [S.N.], p. 213-229, 1998.

BASTIANNSEEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin. **Agriculture Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 94, [S.N.], p. 321-340, 2003.

BURBA, G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. Lincoln: LI-Cor Biosciences, 2013.

CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; CALERA, A.; BALBONTIN, C.; GONZALEZ-PIQUERAS, J. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (Vitis vinifera L). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, n. 1, p. 45-54, 2010.

CARRASCO-BENAVIDES, M.; ORTEGA-FARÍAS, S.; LAGOS, L. O.; KLEISSL, J.; MORALES, L.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; ALLEN, R.G. Crop coefficients and actual evapotranspiration for a drip-irrigated Merlot vineyard using multispectral satellite images. **Irrigation Science**, Berlin, v. 30, [S.N.], p. 537-555, 2012.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: Cana-de-açúcar. Safra 2018/2019. Terceiro levantamento, Brasília, p. 1-65, março 2019.

DING, R.; KANG, S.; LI F.; ZHANGA, Y.; TONGA L.; SUN, Q. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, [S.N.], p. 87-95, 2010

GELI, H. M. E.; NEALE, C. M. U. "Spatial EvapoTranspiration Modelling Interface (SETMI)." In **Remote Sensing and Hydrology**, editado por NEALE, C. M. U.; COSH; M. H. Wallingford: Int Assoc Hydrological Sciences, p. 171-174, 2012.

GONDIM, R. S. TEIXEIRA, A. S.; BARBOSA, F. C. Novo paradigma para a água e coeficientes de cultivos aplicados à gestão de recursos hídricos em nível de bacia hidrográfica. **Revista Item Irrigação e Tecnologia**, Ponta Grossa, n. 67, p. 14-18, 2005.

FRANSSEN, H. J.; STÖCKLI, R.; LEHNER, I.; ROTENBERG, E.; SENEVIRATNE, S. I. Energy Balance Closure of Eddy-Covariance Data: A Multisite Analysis for European Fluxnet Stations, **Agricultural and. Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, [S.N.], p. 1553-1567, 2010.

HERNANDEZ, F. B. T.; SOUZA, S. A. V.; ZOCOLER, J. L.; FRIZZONE, J. A. Simulação e efeito de veranicos em culturas desenvolvidas na região de Palmeira d'Oeste, Estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 21-30, 2003.

HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M.; TEIXEIRA, A. H. C. Uso do satélite Landsat 8 na determinação da produtividade da água em bacia hidrográfica com predomínio do uso agrícola da cana-de-açúcar. **Anais** XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos-SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p.3229-3236, 2015.

KRISHNAN, P.; MEYERS, T. P.; S COTT, R. L.; KENNEDYC, L.; HEUER, M. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semiarid grasslands in North America. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 153, [S.L.], p. 31-44, 2012.

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forestry Meteorology**, Amsterdam, v.77, [S.N.], p. 263-293, 1995.

PAW U, K.T., QIU J.; SU, H.; WATANABE, T.; BRUNET, Y. Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 74, [S.N.], p. 119-137, 1995.

SHUTTLEWORTH, W. J. Putting the "vap" into evaporation. Hydrology and Earth. **System Sciences**, Gottingen, v.11, n. 1, p. 210-244, 2007.

SHAPLAND, T. Surface-Renewal Measurements of actual evapotranspiration. 2014. Disponível em: <https://www.winesandvines.com/template.cfm?section=features&content=127491>. Acesso em: 28 dezembro 2017.

SHAPLAND, T. M; SNYDER, R. L.; SMART, D. R.; WILLIAMS, L. E. Estimation of actual evapotranspiration en winegrape vineyards located on Hillside Terrain using Surface Renewal analysis. **Irrigation Science**, Berlin, v. 30, n. 6, p. 471-484, 2012.

STANNARD, D. I. A theoretically based determination of bowen ratio fetch requirements. **Boundary Layer Meteorology**, Toronto, v. 83, [S.N.], p. 375-406, 1997.

SNYDER, R. L.; SPANO, D.; DUCE, P.; PAW, U. K. T.; RIVERA, M. Surface renewal estimation of pasture evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S.L.], v. 134, [S.N.], p. 716-721, 2008

SU, Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, v. 6, n. 1, p. 85-99, 2002.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; MOURA, M. S. B.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 362, [S.N.], p. 110-127, 2008.

TEIXEIRA, A. H. C. Water productivity assessments from field to large scale: a case study in the Brazilian semi-arid region. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert **Academic Publishing**, 226p, 2009.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEEN, W. G. M.; AHMAD M. D.; MOURA, M. S. B.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, [S.N.], p. 462-476, 2009.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing an Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, n. 5, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agrometeorological stations. In: NEALE, C. M. U.; COSH, M. H. (Ed.). **Remote Sensing and Hydrology**. Wallingford, v. 352, [S.N.], p. 154-157, 2012a.

TEIXEIRA, A. H. C. Determination of surface resistance to evapotranspiration by remote sensing parameters in the semi-arid region of Brazil for land-use change analyses. In: NEALE, C. M. U.; COSH, M. H. (Ed.). **Remote Sensing and Hydrology**, Wallingford, v. 352, [S.N.], p. 167-170, 2012b.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W. G. M. Five methods to interpret field measurements of energy fluxes over a micro-splinkerirrigated mango orchard. **Irrigation Science**, Berlin, v.30, p.13-28, 2012.

TEIXEIRA, A. H. C., HERNANDEZ, F. B. T.; MORRIS, H. L. L.; SCHERER, W.; BASSOI, L. H. Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido Brasileiro. 1. ed. Campinas-SP, 2013a.

TEIXEIRA, A. H. C.; SCHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F. Large-scale water productivity assessments with modis imagens in changing semi-arid environment: A Brazilian case study. **Remote Sensing**, Basel, v. 5, n. 11, p. 5783-5804, 2013b.

TEIXEIRA, A. H. C.; SCHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, G. R.; LEIVAS, J. F. A Comparative Study of Techniques for Modeling the Spatiotemporal Distribution of Heat and Moisture Fluxes in Different Agroecosystems in Brazil. In: PETROPOULOS, G. G. (Ed.). **Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content**. 1. ed. Boca Raton, Florida: CRC Group, Taylor and Francis, 2014a. v. 1, cap. 6, p. 169-191.

TEIXEIRA, A. H. C.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D.DE C.; HERNANDEZ, F. B. T. Sugar cane energy and water balances by remote sensing in the São Paulo, Brazil. In: INSTITUTO DE PESQUISA E INOVAÇÃO NA AGRICULTURA IRRIGADA. **Anais**... Fortaleza: INOVAGRI. p. 749-759, 2014b.

TREZZA, R. Estimation of crop water use from satellite-based surface energy balance models for water management in irrigation districts in Venezuela, south America. In: AIP Conference Proceedings, November, Napoli, Italia. **Anais**… Napoli, Italia: AIP, 2005.

VANHELLEMONT, Q.; RUDDICK, K. Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 145, [S.N.], p. 105-115, 2014.