

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS

Antônio Carlos Novaes Moreira

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UMA ÁREA DE PLANTIO DE
MANGUEIRA NO NORDESTE DO PARÁ: uma abordagem integrada com os Métodos
de Bowen e modelo METRIC-EEFLUX**

Belém-PA
2024

ANTONIO CARLOS NOVAES MOREIRA

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UMA ÁREA DE PLANTIO DE
MANGUEIRA NO NORDESTE DO PARÁ: uma abordagem integrada com os Métodos
de Bowen e modelo METRIC-EEFLUX**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) vinculado ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a Embrapa Amazônia Oriental, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Interação clima, sociedade e ambiente

Orientador: Prof. Dr. Adriano Marlison Leão de Sousa

Belém-PA
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M835e Moreira, Antonio Carlos Novaes.
 Estimativa da evapotranspiração em uma área de plantio de
 mangueira no Nordeste do Pará: : uma abordagem integrada com os
 Métodos de Bowen e modelo METRIC-EEFLUX / Antonio Carlos
 Novaes Moreira. — 2024.
 79 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Adriano Marlison Leão de Sousa
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
 Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências
 Ambientais, Belém, 2024.
1. Evapotranspiração. 2. Mangifera indica L.. 3. METRIC.
 4. EEFLUX. 5. Bowen. I. Título.

CDD 630.2515098115

Antonio Carlos Novaes Moreira

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UMA ÁREA DE PLANTIO DE
MANGUEIRA NO NORDESTE DO PARÁ: uma abordagem integrada com os Métodos
de Bowen e modelo METRIC-EEFLUX**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) vinculado ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a Embrapa Amazônia Oriental, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Interação clima, sociedade e ambiente

Data da aprovação: 22/03/2024

Conceito: Aprovado

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ADRIANO MARLISON LEAO DE SOUSA**
Data: 07/08/2024 13:40:0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Adriano Marlison Leão de Sousa – Orientador
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **GLAUBER GUIMARAES CIRINO DA SILVA**
Data: 07/08/2024 17:43:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Glauber Guimarães Cirino da Silva
Doutor em Clima e Ambiente
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **JOAO SANTOS NAHUM**
Data: 09/08/2024 15:12:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. João Santos Nahum
Doutor em Geografia e Organização do Espaço
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **PAULO JORGE DE OLIVEIRA PONTE DE SOUZA**
Data: 10/08/2024 10:50:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza
Doutor em Meteorologia Agrícola
Universidade Rural da Amazônia

RESUMO

A pesquisa apresenta uma avaliação comparativa do consumo hídrico da manga na região do Nordeste do Pará, destacando a importância da estimativa da evapotranspiração para o estudo do ciclo hidrológico e sustentabilidade agrícola. Explora-se a utilização de métodos tradicionais, como o Método de Razão de Bowen, e técnicas de sensoriamento remoto, especificamente o modelo METRIC-EEFLUX, para estimar a Evapotranspiração real (ET_r) de uma cultura. Com isso, revelou-se uma influência do pomar de mangueira *Tommy Atkins* na dinâmica hídrica em Cuiarana, Pará.. A ET_r variou notavelmente entre as safras, com um consumo médio diário de 4,59 mm e 4,84 mm, respectivamente, para as Safras 1 e 2. O estudo oferece uma compreensão aprofundada do ciclo hidrológico local, com o pomar contribuindo com cerca de 185.958 m³ para o ciclo. A análise da ET_r através do METRIC-EEFLUX revelou uma variabilidade espacial e temporal notável, com algumas discrepâncias em relação ao método de Bowen. Apesar de uma forte correlação positiva, o METRIC-EEFLUX tendeu a superestimar a ET_r. O desempenho do modelo METRIC-EEFLUX foi classificado como “ruim”, destacando a necessidade de aprimoramento contínuo e calibração específica para a região amazônica. O estudo enfatiza a necessidade de pesquisas contínuas para aprimorar a precisão das estimativas hídricas, fornecendo *insights* valiosos para a gestão eficaz dos recursos hídricos

Palavras-chaves: evapotranspiração; *mangifera indica L.*; EEFLUX; METRIC; Bowen;

ABSTRACT

The research presents a comparative evaluation of the water consumption of mango in the Northeast region of Pará, highlighting the importance of evapotranspiration estimation for the study of the hydrological cycle and sustainability of agricultural. The use of traditional methods, such as the Bowen Ratio Method, and remote sensing techniques, specifically the METRIC-EEFLUX model, are explored to estimate the crop's Evapotranspiration. This revealed an influence of the Tommy Atkins mango orchard on the water dynamics in Cuiarana, Pará. The ETr varied notably between the crops, with an average daily consumption of 4.59 mm and 4.84 mm, respectively, for Crops 1 and 2. The study offers an in-depth understanding of the local hydrological cycle, with the orchard contributing about 185,958 m³ to the cycle. The analysis of ETr through METRIC-EEFLUX revealed notable spatial and temporal variability, with some discrepancies in relation to the Bowen method. Despite a strong positive correlation, METRIC-EEFLUX tended to overestimate ETr. The performance of the METRIC-EEFLUX model was classified as “poor”, highlighting the need for continuous improvement and specific calibration for the Amazon region. The study emphasizes the need for continuous research to improve the accuracy of water estimates, providing valuable insights for the effective management of water resources.

Keywords: evapotranspiration; *mangifera indica L.*; EEFLUX; METRIC; Bowen

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Localização do sítio experimental de Cuilarana, nordeste do Pará.....	32
Figura 2 -	Radiação Solar Global Incidente nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).....	36
Figura 3 -	Saldo de radiação nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).....	37
Figura 4 -	Temperatura média nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).....	38
Figura 5 -	Umidade relativa nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).....	39
Figura 6 -	Precipitação nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).....	40
Figura 7 -	Velocidade do vento nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).....	41
Figura 8 -	Evapotranspiração real do pomar de mangueira <i>Tommy Atkins</i> nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).....	42
Figura 9 -	Localização do pomar de mangueira <i>Tommy Atkins</i> em Cuilarana, nordeste do Pará.....	53
Figura 10 -	Variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração real do pomar de mangueira <i>Tommy Atkins</i>	60
Figura 11 -	Dispersão entre a ETr-EEFLUX e a ETr-Bowen ao redor da linha 1:1, coeficientes de correlação (r) e concordância (dr), índices estatísticos RMSE e MBE e desempenho Pi da cultura da mangueira <i>Tommy Atkins</i>	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Características das bandas sensores Sentinel-2, Landsat-8 e MODIS, aplicáveis a estudos agroambientais.....	25
Tabela 2 -	Equações utilizadas no algoritmo METRIC para o saldo de radiação (R_n).....	26
Tabela 3 -	Instrumentos utilizados no monitoramento micrometeorológico em um pomar de manga, cv. Tommy Atkins, Salinópolis, Pará, Brasil.....	33
Tabela 4 -	Condições necessárias para aceitação dos valores da razão de Bowen.....	35
Tabela 5 -	Classes de erro e condições para rejeição dos valores da razão de Bowen.....	35
Tabela 6 -	Evapotranspiração real (E_{Tr}) média e acumulada ao longo dos meses das Safras 1 e 2.....	43
Tabela 7 -	Parâmetros para aceitação dos dados da Razão de Bowen.....	56
Tabela 8 -	Categorias de Inconsistências e Critérios para Exclusão de Dados da Razão de Bowen.....	56
Tabela 9 -	Classificação do índice de desempenho (P_i).....	58
Tabela 10 -	Informações das imagens escolhidas através da plataforma EEFLUX.....	59
Tabela 11 -	Condições ambientais locais no momento da passagem dos satélites.....	60
Tabela 12 -	Evapotranspiração real estimada pelo método de Bowen (E_{Tr} -Bowen) e Evapotranspiração real estimada pelo METRIC-EEFLUX (E_{Tr} -EEFLUX) e seus respectivos erros relativos.....	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABH	Anuário Brasileiro de Horti&Fruti
	Calibration
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET	Evapotranspiração
ETc	Evapotranspiração da Cultura
ETo	Evapotranspiração de Referência
ETp	Evapotranspiração Potencial
ETr-Bowen	Evapotranspiração Real Estimada pelo Método de Bowen
ETr-Eeflux	Evapotranspiração Real estimada pelo METRIC-EEFLUX
ET_{oF}	Fração Evaporativa
E_{inst}	Evapotranspiração Instantânea
Faostat	Food and Agriculture Organization of the United Nations
G	Fluxo de Calor no Solo
GEE	Google Earth Engine
H	Fluxo de Calor Sensível
Ibge	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Inmet	Instituto Brasileiro de Meteorologia
Kc	Coeficiente de Cultivo
MBE	Erro Médio Absoluto
METRIC	Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized
METRIC-EEFLUX	Earth Engine Evapotranspiration Flux
MRB	Método da Razão de Bowen
PP	Precipitação
RMSE	Erro Médio Quadrático
Rn	Saldo de Radiação
RSR	Radiação Solar Global Incidente
SE	Sensoriamento Remoto
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
Ta	Temperatura do Ar
Tm	Temperatura Média
UR	Umidade Relativa
VV	Velocidade do vento
ZIT	Zona de Convergência Intertropical

β

Razão de Bowen

λE

Fluxo de Calor Latente

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL.....	13
CAPÍTULO 2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
CAPÍTULO 3 REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 Cultura da Manga (Mangifera indica L.).....	18
3.2 Ciclo Hidrológico e Evapotranspiração.....	19
3.3 Fatores que influenciam a Evapotranspiração	20
3.4 Estimativas da Evapotranspiração	22
3.5 Método do Balanço de Energia pela Razão de Bowen.....	23
3.6 Estimativa da Evapotranspiração por sensoriamento remoto.....	24
3.6.1 Mapping Evapotranspiration at high resolution with Internalized (METRIC).	26
CAPÍTULO 4 CONSUMO HÍDRICO DA MANGUEIRA NO NORDESTE DO PARÁ UTILIZANDO O MÉTODO DE RAZÃO DE BOWEN.....	30
4.1 Introdução.....	30
4.2 Materiais e Métodos	32
4.2.1 Área de estudo	32
4.2.2 Estimativa da Evapotranspiração pelo Método de Razão de Bowen	33
4.3 Resultados e Discussões	35
4.3.1 Condições Ambientais.....	35
4.3.1.1 Radiação Solar Global Incidente	35
4.3.1.2 Saldo de radiação.....	37
4.3.1.3 Temperatura média diária.....	38
4.3.1.4 Umidade relativa.....	39
4.3.1.5 Precipitação	39
4.4 Consumo Hídrico e Evapotranspiração	41
4.5 Conclusão	44
CAPÍTULO 5 DESEMPENHO DO METRIC-EEFLUX NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DE UM POMAR DE MANGUEIRA NO NORDESTE DO	

PARÁ.....	51
5.1 Introdução	51
5.2 Materiais e Métodos	53
5.3.1 Área de Estudo.....	53
5.3.2 Evapotranspiração real pelo Earth Engine Evapotranspiration Flux.....	54
5.3.3 Evapotranspiração real pelo Método de Bowen	55
5.3.4 Validação e análise das estimativas.....	57
5.4 Resultados e Discussão.....	59
5.5 Conclusão	63
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO GERAL.....	68
REFERÊNCIAS.....	69

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

A Evapotranspiração (ET) pode ser definida como um fenômeno físico de transferência de água da superfície da terra para a atmosfera. Ou seja, é a ocorrência simultânea dos processos de evaporação da água do solo e da transpiração da vegetação em decorrência da energia provida pela radiação solar (Diniz *et al.*, 2021).

Tanto a precipitação quanto a ET são indicadores do clima de uma região e desempenham um papel fundamental como ferramentas de apoio à tomada de decisão na gestão da água na agricultura. Enquanto a precipitação representa a entrada de água na região, a ET, por sua vez, quantifica a quantidade de água necessária para uma gestão eficiente dos recursos hídricos, contribuindo para o balanço energético da superfície, destacando sua importância tanto no ciclo hidrológico quanto na gestão dos recursos naturais (Afzaal *et al.*, 2020).

Dada a importância do processo de ET, torna-se imperativo estudá-lo em face das alterações climáticas que influenciam seus padrões. Tal impacto direto é evidenciado por estudos como o de Cavalcante *et al.* (2018) no cultivo do milho no Nordeste do Brasil, e por Oliveira *et al.* (2020) no cultivo da cana-de-açúcar em Maceió.

É nesse contexto que através da determinação da Evapotranspiração da cultura (ET_c) e do Coeficiente de cultivo (K_c) é possível determinar o suprimento hídrico necessário, em lâmina de irrigação, que essa cultura precisa para todos os seus processos fisiológicos em um clima local, sendo possível monitorar e calcular o uso da água em seus diferentes períodos fenológicos (Soares *et al.*, 2021).

Existem diversos métodos para determinação da ET. Entre eles há os métodos diretos (balanço de água e umidade do solo) e indiretos (Penman-Monteith e Razão de Bowen). De acordo com Allen *et al.* (2002), embora sejam eficientes, os métodos mencionados possuem limitações que podem impactar sua viabilidade em determinados contextos.

No que se refere ao Método de Razão de Bowen (MRB), este método leva em conta os fluxos de energia responsáveis por aquecer o ar (fluxo de calor sensível - H) e o solo (fluxo de calor do solo - G), além do fluxo de calor latente (LE) envolvido na transformação da água líquida em gás realizada em uma área específica, representada pela vegetação (André *et al.*, 2010). O MRB se destaca como uma opção simples e prática para estimar o consumo hídrico das culturas (Teixeira *et al.*, 2003).

O MRB já foi utilizado para estudos do balanço de energia e ET com resultados promissores para diversas culturas como da cana-de-açúcar (Silva *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2012; Esteves *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2020), da banana (Teixeira *et al.*, 2002), do feijão caupi (Lima *et al.*, 2006; Paula *et al.*, 2019), da soja (Pierdoná *et al.*, 2019), do

açaí (Sousa *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2023) e da manga principalmente no semiárido brasileiro (Azevedo, Silva e Silva, 2003; Teixeira; Bastiaanssen, 2012) e na região amazônica (Rodrigues; Souza; Lima, 2013; Souza *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2018).

Outra ferramenta utilizada para determinar a ET é o uso de sensoriamento remoto (SR). Através das imagens de satélite é possível estudar a cobertura de grandes áreas e determinar a ET regional (Hafeez *et al.*, 2002). Ademais, quando utilizado em conjunto com dados agrometeorológicos, o SR tem grande potencial para se tornar um instrumento eficiente para o manejo e gerenciamento da água em larga escala tanto para cultivos em sequeiro e irrigados (Silva *et al.*, 2021).

Diferentes técnicas de sensoriamento remoto foram desenvolvidas nas últimas décadas para determinar a ET, dentre elas destacam-se o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (Bastiaanssen *et al.*, 1998) e o *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) (Allen; Tasumi; Trezza, 2007).

O modelo METRIC foi desenvolvido com o objetivo de gerar mapas altamente precisos de ET para áreas de dimensões reduzidas, abrangendo algumas centenas de quilômetros quadrados, com alta resolução espacial utilizando informações de imagens de satélite para realizar um balanço de energia, o qual é calibrado internamente em duas situações extremas: seca e úmida. Para esse ajuste, são empregados dados meteorológicos disponíveis localmente (Allen; Tasumi; Trezza, 2007).

Este modelo apresenta um eficaz desempenho na estimativa da ET como pode ser visto nos estudos desenvolvidos sobre o algodão (French *et al.*, 2015), o milho (Singh *et al.*, 2012), da soja (Choi *et al.*, 2009), a cana-de-açúcar (Zhang; Anderson; Whang, 2015), a banana (Diniz *et al.*, 2021) entre outros. Destaca-se que não há nenhum estudo que utilize o METRIC para determinar a ET da cultura da manga na região amazônica.

O METRIC foi amplamente avaliado em diversos locais nos EUA, usando medições de ET por lisímetros, razão de Bowen e torres de covariância turbulenta (Allen *et al.*, 2015; Tasumi *et al.*, 2005). Os resultados das comparações com medições reais têm sido muito positivos devido à utilização de algoritmos baseados em princípios físicos, garantindo uma abordagem robusta.

Dessa forma, o METRIC estabeleceu-se como um modelo confiável e consolidado, sendo frequentemente empregado na gestão de recursos hídricos em vários estados e agências federais (Irmak *et al.*, 2012). Sua adoção generalizada reflete a confiança da comunidade científica e profissionais na sua precisão e utilidade para questões importantes relacionadas à disponibilidade e gestão da água.

Contudo, a obtenção da estimativa da ET através dos métodos como o METRIC demanda conhecimento especializado na equação de balanço de energia, agronomia e assim como a compreensão das técnicas de processamento digital de imagens de satélite (Allen *et al.*, 2015; Reyes-González, 2018). Tais fatos restringem o uso dessas metodologias em pesquisas e aplicações práticas (Filgueiras *et al.*, 2019).

Nesse sentido, com a finalidade de facilitar a estimativa da ET ao usuário final, minimizar erros no processo de calibração, automatizar a coleta e manipulação de dados e otimizar a velocidade de obtenção das estimativas de ET, foi criado o aplicativo METRIC-EEFLUX (*Earth Engine Evapotranspiration Flux*) na plataforma do GEE (*Google Earth Engine*). Essa ferramenta possibilita a obtenção de estimativas da Evapotranspiração real (ET_r) para qualquer data e localidade do globo através de imagens do satélite LANDSAT desde 1984 até os dias de hoje em questão de minutos, como relatado por Allen *et al.* (2015).

Diante disso, a justificativa para essa pesquisa reside na importância do monitoramento preciso e eficiente da ET em pomares de mangueira, especialmente em regiões com clima tropical úmido e características específicas como as encontradas em Cuiarana, no nordeste do Pará.

O conhecimento sobre o consumo de água de uma cultura é fundamental para o manejo adequado da irrigação, auxiliando no uso racional da água na agricultura (Tagliaferre *et al.*, 2010). Dessa forma, garante-se uma maior rentabilidade da produção agrícola, trazendo benefícios sociais e econômicos, e a sustentabilidade do recurso água (Lucas, 2007; Majid *et al.*, 2015).

Além disso, esse conhecimento em culturas que não são irrigadas, também possibilita a otimização das épocas de semeadura, levando em conta a média da disponibilidade de água na região estudada, resultando em um aproveitamento mais eficiente das precipitações para a produção agrícola (Berlato; Molion, 1981).

Ao comparar os resultados obtidos pelo METRIC-EEFLUX com a estimativa da ET dada pelo MRB, será possível avaliar a precisão e a confiabilidade dessas abordagens e identificar possíveis desvios ou discrepâncias.

Essa comparação contribuirá para a validação e aprimoramento do METRIC-EEFLUX em condições específicas do pomar de mangueira em Cuiarana, fornecendo dados científicos relevantes para o manejo da irrigação nesse contexto.

Os resultados dessa pesquisa terão implicações práticas significativas para Ciências Ambientais, auxiliando no desenvolvimento de estratégias mais eficientes de manejo da água no cultivo de mangueiras, reduzindo desperdícios e custos associados à irrigação excessiva.

Atrelado a isso, o conhecimento gerado permitirá uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos na região do nordeste do Pará, contribuindo para a promoção da agricultura de forma responsável e alinhada com os princípios da conservação ambiental.

Assim, este estudo terá um impacto positivo tanto no desenvolvimento do cultivo da manga, com ênfase na gestão da água, como na ampliação do conhecimento científico acerca dos métodos utilizados para determinar a ET nas condições específicas da região Amazônica.

Com base no que foi exposto, foi elaborado 2 capítulos para esta pesquisa:

Capítulo 4: Consumo hídrico da mangueira no nordeste do Pará utilizando o método de Bowen: compreende a utilização do método empírico de Bowen para estimar o consumo hídrico do pomar de mangueira Tommy Atkins através de dados meteorológico no período de duas safras dos anos de 2021 e 2022.

Capítulo 5: Desempenho do METRIC-EEFLUX na estimativa da evapotranspiração real de um pomar de mangueira no nordeste do Pará: Compreende o estudo da distribuição espacial da ETr e do desempenho e classificação da estimativa da ETr de um pomar de mangueira Tommy Atkins através do modelo *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) na versão do *Earth Engine Evapotranspiration Flux* (METRIC-EEFLUX) tendo como referência o Método de Razão de Bowen (MRB).

CAPÍTULO 2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar a evapotranspiração através do algoritmo METRIC na versão METRIC-EEFLUX e pelo Método de Razão de Bowen em uma área de pomar de mangueira *Tommy Atkins* localizado em Cuiarana, no nordeste do Pará.

2.2 Objetivos específicos

- Estimar o consumo hídrico do pomar de mangueira pelo método de Razão de Bowen;
- Determinar a Evapotranspiração real (E_{Tr}) espacial e temporal do pomar de mangueira pelo algoritmo METRIC-EEFLUX;
- Avaliar e classificar as estimativas do METRIC-EEFLUX em comparação ao método de razão de Bowen;

CAPÍTULO 3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Cultura da Manga (*Mangifera indica* L.)

Segundo a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Faostat), em 2019, a produção mundial de manga alcançou cerca de 56 milhões de toneladas, colocando-a como a sexta fruta mais cultivada em escala global. O Brasil, por sua vez, ocupa a sétima posição entre os países produtores deste fruto, se destacando como um importante exportador (Faostat, 2019).

Entre as regiões brasileiras, o Nordeste é o líder no cultivo da manga, respondendo por cerca de 77% da produção do país. Só no ano de 2020 a produção de manga pelo estado da Bahia ficou em torno de 470.487 mil toneladas (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2020) rendendo um valor de produção de 755.383 mil reais, enquanto o estado do Pará gerou um valor de produção de apenas 106 mil reais no ano de 2020 (Anuário brasileiro de horti&fruti – ABH, 2020).

Na esfera da agricultura familiar, a inclusão da fruta em questão desempenha um papel significativo não apenas na diversificação da dieta, mas também na geração de diversos recursos e na melhoria da renda familiar (Garcia; Vieira; Oliveira, 2015). Seja consumida fresca ou processada em uma variedade de produtos, como polpa, suco, sorvete, geleias e compotas, essa fruta oferece uma ampla gama de benefícios nutricionais e medicinais (Wall-Medrano *et al.*, 2015). Nas comunidades rurais, várias partes da espécie *M. indica* L., incluindo folhas, frutos, sementes, cascas, raízes, flores e brotos, são empregadas na medicina tradicional para tratar condições como diabetes, reumatismo, disenteria e gripe (Lima *et al.*, 2019).

Esta cultura sobrevive em temperaturas que vão de -6 até 40 °C (Andrade, 2021), porém ela cresce saudavelmente em condições tropicais e subtropicais onde a média anual está acima de 20 °C (Lipan *et al.*, 2021) sendo indicado para sua produção comercial temperaturas entre 24 a 30 °C (Rodrigues; Souza; Lima, 2013).

No seu cultivo, há necessidade de água em todas as suas fases vegetativas, entre a colheita e a floração; floração; crescimento de frutos; e colheita (Pinto *et al.*, 2021). Isso porque, por mais que a mangueira seja resistente a seca, a literatura aponta que um solo com baixa disponibilidade hídrica, propiciado pelo incorreto manejo da irrigação, pode afetar o sistema radicular e o crescimento da parte aérea acarretando em frutos de má qualidade e baixa produtividade (Prakash *et al.*, 2015).

A Amazônia, com sua exuberante biodiversidade e vastos recursos hídricos, é uma região singular do planeta. No entanto, mesmo nesse cenário, a necessidade de garantir o fornecimento adequado de água para culturas de alto valor econômico, como a mangueira, não

pode ser negligenciado. Uma vez que, vivemos em um período de mudanças e incertezas acerca do uso da água (Zuazo *et al.*, 2021) devido a intensificação da agricultura e das mudanças climáticas que levam ao aumento da evapotranspiração potencial, diminuição da precipitação total e o aumento da frequência de secas (Chartzoulakis; Bertak, 2015).

Diante dessa necessidade de garantir o fornecimento adequado de água para a cultura da mangueira, torna-se imprescindível o estudo do balanço de energia, que engloba a utilização de métodos confiáveis e eficientes para determinar a evapotranspiração (ET) (Silva, 2019).

3.2 Ciclo Hidrológico e Evapotranspiração

A mensuração do consumo hídrico em amplas extensões territoriais e projetos de irrigação é crucial para a gestão e uso sustentável dos recursos aquáticos, ganhando crescente aplicabilidade em diversas regiões do globo (Bastiaanssen *et al.*, 2005; Allen; Tasumi; Trezza, 2007). Devido à sua função de conexão entre a energia, clima e hidrologia (Braun *et al.*, 2001), a Evapotranspiração (ET) desempenha um papel de grande relevância.

A ET é um parâmetro importante para observar as interações solo-planta-atmosfera (Liu *et al.*, 2013), uma vez que conhecer a taxa evaporativa de uma determinada área contribui para estudos acerca da gestão dos recursos hídricos, produtividade e otimização do uso da água, mudanças climáticas e principalmente o manejo da irrigação de uma determinada cultura (Anapalli, 2016).

A quantificação da ET para aplicações em irrigação requer, em primeiro lugar, a determinação da Evapotranspiração de referência (ET_o). De acordo com Doorenbos e Pruitt (1977), a ET_o é definida como a evapotranspiração de uma extensa área uniforme coberta por grama, com altura entre 8 e 15cm, crescimento ativo, disponibilidade adequada de água e cobertura total do solo.

Em um estágio posterior, Allen *et al.* (1998) introduziram um novo conceito de ET_o, projetado para avaliar o poder de evaporação da atmosfera em um local específico, independentemente do tipo de cultura, estágio de desenvolvimento ou práticas de manejo. A superfície de referência é uma área gramada sem restrições hídricas, com altura de 12 cm, resistência superficial de 70 s m⁻¹ e coeficiente de reflexão de 0,23.

A evapotranspiração de uma cultura em condições padrões (ET_c) representa a quantidade de água necessária para manter crescimento e produção ideais. É definida por Allen *et al.* (1998) como semelhante à ET_o, mas aplicada a qualquer cultura em desenvolvimento sem limitações hídricas, nutricionais ou de pragas e doenças. Lewis e Allen (2017) veem a ET_c

como o potencial uso de água pela cultura, a quantidade que seria evaporada do solo e transpirada pela cultura em condições perfeitas.

Além dos diversos métodos diretos e indiretos, a ET_c também pode ser obtida multiplicando a ET_o pelo coeficiente de cultivo (K_c), que leva em conta as demandas hídricas da cultura em diferentes fases de crescimento e é influenciado pelo tipo, distribuição e condição da vegetação. Como as características vegetativas são mais uniformes em culturas agrícolas do que em vegetação natural, K_c costuma ser considerado constante entre regiões para culturas idênticas, já que a ET_o , por definição, reflete variações climáticas entre locais diferentes (Allen; Pereira, 2009).

Existe ainda a definição de Evapotranspiração real (ET_r) ou, segundo Allen *et al.* (1998), evapotranspiração de uma cultura em condições não padrão, que podem prejudicar seu desenvolvimento. Lewis e Allen (2017) apontam que a ET_r geralmente é menor que a ET_c e inclui fatores que reduzem a eficiência do uso da água pela cultura, como baixa umidade no solo, fertilidade limitada, doenças e danos por pragas. Para Camargo, A. e Camargo, M. (2000), a ET_r é a perda de água de uma superfície natural sob qualquer condição de umidade e cobertura vegetal.

Não há consenso na comunidade científica sobre o tipo ideal de ET, que varia de acordo com o objetivo, sendo a ET_c e ET_r as formas mais relevantes na agricultura e no manejo da irrigação (Oliveira *et al.*, 2021). A determinação de cada uma requer dados específicos, resultado de avanços em hidrologia, meteorologia e fisiologia vegetal, além do desenvolvimento de sensores e modelos matemáticos.

3.3 Fatores que influenciam a Evapotranspiração

De acordo com Allen *et al.* (1998) e Pereira *et al.* (2002), a evapotranspiração é grandemente moldada por fatores que abrangem a vegetação, a prática de manejo do solo e a administração das condições ambientais. Entretanto, sua influência é especialmente marcada por componentes temporais, como radiação solar global (RSG), temperatura da superfície (T_s), temperatura do ar (T_a) e umidade relativa do ar (UR), além da velocidade do vento (VV) (Darshana; Pandey, A.; Pandey, R., 2013). Isso porque a combinação de temperaturas elevadas da superfície e do ar, umidade baixa, céu sem nuvens e ventos vigorosos atua de forma significativa na promoção da evapotranspiração (Santos, 2009).

Conforme Vicente-Serrano *et al.* (2014) esclarece que essas variáveis têm um papel fundamental na caracterização dos componentes radioativos (energia solar disponível) e

aerodinâmicos (capacidade de secagem do ar por meio da velocidade do vento e umidade atmosférica) da ETo.

De forma geral, um aumento na disponibilidade de energia solar, na Tar e na VV, aliado a uma redução na UR, tende a intensificar a demanda evaporativa da atmosfera. Essa interação resulta em uma taxa elevada de evapotranspiração, desde que a umidade do solo não exerça um papel restritivo decisivo (Tagliaferre *et al.*, 2010).

A RSG desempenha um papel essencial na evapotranspiração de referência, requerendo medidas precisas devido à sua influência significativa (Lemos *et al.*, 2010). A energia disponível, conhecida como saldo de radiação(Rn), é a principal fonte de energia para processos naturais, como o metabolismo biológico, a perda de água pelas vegetações, as variações de temperatura no sistema solo-planta-atmosfera e a decomposição orgânica (Pereira *et al.*, 2014). A quantidade de RSG que atinge a superfície evaporativa varia conforme a localização, a estação do ano e as condições atmosféricas presentes (Allen *et al.*, 1998).

Além dos fatores climáticos, elementos como o tipo de cultura, a variedade, o estágio de crescimento e a densidade de plantio também exercem influência na ETc. Isso ocorre devido às diferenças nas resistências à transpiração, na altura da cultura, na rugosidade do dossel, na reflexão solar, na cobertura do solo e nas características das raízes, resultando em níveis diversos de evapotranspiração entre diferentes culturas, mesmo sob condições climáticas e de solo semelhantes (Paula *et al.*, 2018).

A presença de fatores como salinidade e fertilidade do solo, aplicação limitada de nutrientes, camadas impermeáveis no solo e ausência de controle de doenças e pragas também podem limitar o desenvolvimento da cultura e, conseqüentemente, reduzir a evapotranspiração (Allen *et al.*, 1998).

Segundo Tanny (2013), além das variações climáticas, a dinâmica da evapotranspiração também está sujeita às particularidades de cada tipo de cultura. Algumas plantas possuem estômatos que não reagem às mudanças na umidade do ar. Quando uma cultura ainda não cobre completamente a superfície de um campo agrícola, a perda predominante de água ocorre por evaporação do solo. No entanto, quando o dossel vegetativo cobre totalmente a superfície, a transpiração passa a ser o principal processo de perda de água (Sentelhas *et al.*, 2010).

Outro fator emergente nos estudos hidrológicos é o acoplamento da componente Homem-água. A alteração do uso da terra feita pelo homem modifica a interação da RSG com a superfície (Diro *et al.*, 2014). As mudanças climáticas, sejam causadas por forças naturais ou antropogênicas, afetam as taxas evaporativas alterando de forma quantitativa e qualitativamente a qualidade das águas subterrâneas (Baruffi *et al.*, 2012).

Os incêndios florestais também são capazes de alterar a ET de uma localidade. Hâusler *et al.* (2018) constataram perturbações no ciclo da água após incêndios não só através de alteração da taxa e no fluxo de calor latente após o ocorrido. Depois de estudar a resposta global ao fogo-clima para os incêndios florestais de 2003-2014, Liu *et al.* (2019) sugeriram que a resposta positiva ao aquecimento foi responsável por uma diminuição na ET, que durou 5 anos após o incêndio e o aumento consecutivo no albedo resultou na redução do efeito de resfriamento.

Outra atividade humana que afeta a ET são as práticas agrícolas. Mueller e colaboradores (2017) declararam que o aumento da produtividade, que inclui a irrigação contínua, impacta o clima ao aumentar a ET. A irrigação tem um efeito direto no ciclo hidrológico de uma região e o excesso de água no solo eleva as taxas de ETr (Lu *et al.*, 2015). Atrelado a isso, a disponibilidade de nitrogênio proveniente do uso de fertilizantes, biossólidos e demais adubos e corretivos estão correlacionados com aumento das taxas evaporativas (Rudnik; Irmak, 2014).

Dessa forma, assim como Dimitriadou e Nikolakopoulos (2021) afirmam, alterações climáticas atrelados ao uso e ocupação do solo desencadeiam um desequilíbrio no ciclo hidrológico que intensifica ou diminui as taxas evaporativas acarretando interferência no balanço hídrico.

3.4 Estimativas da Evapotranspiração

A ET pode ser estimada por métodos diretos e indiretos, os fatores que influenciam para essa escolha são a precisão requerida de dados para o estudo, os custos de medição e as condições da área de estudo (Venancio *et al.*, 2020; Escarabajal-Henarejos *et al.*, 2015).

Os métodos diretos se dão pelo balanço de água no solo e são considerados os mais exatos para encontrar a ET de uma determinada área (Diniz *et al.*, 2021). Os lisímetros, por exemplo, são os mais amplamente utilizados para calibração e validação de outros métodos para determinar a ET (Paula *et al.*, 2019).

No que se refere aos métodos indiretos, eles se baseiam na avaliação de dados meteorológicos através de equações empíricas (Razão de Bowen, Penman-Monteith) (Camargo, A.; Camargo, M., 2000; Rojas; Sheffield, 2013). Vários desses métodos utilizam dados meteorológicos que nem sempre estão amplamente disponíveis (Paula *et al.*, 2019), tais como: radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, exigindo a utilização de métodos mais simples (Alblewi *et al.*, 2015).

Comumente usados para determinar a ET nos mais diversos climas e regiões, o método de Penman-Monteith é reconhecido mundialmente por ser o método padrão em estimativas da evapotranspiração de referência desde a sua publicação 56 da Faostat (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) (Allen *et al.*, 1998).

É considerado um método complexo por demandar um alto número de variáveis meteorológicas, por esse fato, possui limitações quando aplicado em situações de campos experimentais e em áreas agrícolas onde há o emprego de alto padrão tecnológico (Andrade *et al.*, 2003).

3.5 Método do Balanço de Energia pela Razão de Bowen

As análises de Bowen baseiam-se nas trocas de energia térmica radiativa, condutiva e convectiva por uma superfície (Kang; Zhang, B.; Zhang, L., 2008). Este método é capaz de solucionar a equação de balanço de energia medindo gradientes de temperatura do ar e pressão através de sensores calibrados de alta resolução instalados em diferentes alturas determinando a temperatura e pressão real de vapor em diversos pontos (Allen *et al.*, 2011; Euser *et al.*, 2014).

Bowen (1926) definiu a relação entre os fluxos de calor sensível (H) e λE para calcular os fluxos turbulentos de calor sensível e calor latente em uma superfície natural. Para isso, é necessário que se conheça o R_n , G , a diferença das leituras de termômetros úmidos ($\Delta TU = TU_2 - TU_1$) e secos ($\Delta T = T_2 - T_1$) colocados em dois níveis altimétricos, a temperatura média úmida (MTU) e o valor médio de $(TU_2 + TU_1)$. De acordo com o que foi descrito na Eq. 1 o balanço de energia corresponde:

$$R_n = H + \lambda E \quad \text{Equação (1)}$$

A Razão de Bowen (β) é equacionada na sua forma mais simples:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad \text{Equação (2)}$$

Em geral, a partir do valor de β pode-se determinar o fluxo de energia que está retornando à atmosfera. Se β for maior que 1, indica maior fluxo energia em calor sensível para atmosfera (clima seco), já se $\beta < 1$ o fluxo de energia para a atmosfera é maior como calor latente (Irmak; Skaggs; Chatterjee, 2014; Paula *et al.*, 2018).

No Brasil, a estimativa da evapotranspiração através da Razão de Bowen foi realizada pela primeira vez por Villa Nova (1973) em uma área cultivada com arroz, utilizando psicrômetros com pares termoeletrônicos.

Na região amazônica o método de Bowen foi utilizado por Soares e Webler (2016), para buscar possíveis interações climáticas nos períodos úmido, úmido-seco, seco e seco-úmido no ano de 2009, os autores obtiveram resultados para esses períodos na razão de Bowen de 0.21; 0.24; 0.30; 0.21, respectivamente demonstrando que a floresta pouco se altera com a sazonalidade durante o ano ao contrário dos biomas de transição (Amazônia-Cerrado) e da área de pastagem.

Souza *et al.* (2018), utilizaram também o método de Bowen para avaliar o balanço energético diurno na fase reprodutiva durante duas safras de um pomar de mangueiras no nordeste paraense. Os autores concluíram que a quantidade de chuvas é uma determinante para a partição da radiação líquida nas componentes do balanço de energia, proporcionando a variação do consumo da energia disponível entre 69% e 78% como fluxo de calor latente, e entre 23% e 32%, como fluxo de calor sensível.

Sousa *et al.* (2021) aplicaram este método em um pomar de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) localizado na Amazônia Oriental. Os requisitos totais de água encontrados pelos autores para os açaizeiros foram de 1165 mm, com média diária de 3,49 mm dia⁻¹ para a estação de crescimento.

Apesar dos resultados promissores encontrados por estudo que utilizam a razão de Bowen, métodos micrometeorológicos como este tem suas limitações. Os resultados são válidos apenas para áreas com culturas de mesmas condições fenológicas, hídricas, de configuração de plantio e, quando irrigadas, sujeitas a um mesmo sistema de irrigação, não sendo capazes, portanto, de realizar estimativas em áreas de grandes dimensões (Bezerra *et al.*, 2008).

3.6 Estimativa da Evapotranspiração por sensoriamento remoto

Segundo Courault, Segui e Oliosio (2003), as abordagens que utilizam dados de sensoriamento remoto para determinar a evapotranspiração são desafiadoras de classificar devido à combinação de conceitos físicos e empíricos, o que as torna um método intermediário.

Sendo capazes de identificar assinaturas espectrais de todas as superfícies e objetos, os sensores remotos convertem essas irradiâncias detectadas em características de superfície como albedo, índice de área foliar, índice de vegetação, emissividade e temperatura, possibilitando a estimativa da ET como resíduo da equação do balanço de energia (Consoli; Vanella, 2014).

Vários estudos já foram realizados utilizando o sensoriamento na Amazônia, como por exemplo, na análise de desmatamentos (Shimabukuro *et al.*, 1994; Caldas *et al.*, 2003; Maurano *et al.*, 2019), na estimativa de evapotranspiração (Malhi *et al.*, 2002; Sousa *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2020) entre outros estudos. Contudo, há poucos estudos utilizando sensoriamento para estimar a ET da mangueira na região amazônica.

Na agricultura o sensoriamento remoto tem várias aplicações como o mapeamento e monitoramento do uso e cobertura da terra, identificação de culturas, estimativa de produtividade, monitoramento das condições agrícolas e de riscos climáticos (Formaggio; Sanches, 2017). Contudo, esse método possui limitações no que se refere à utilização de sensores passivos, uma vez que eles necessitam da radiação solar para obterem imagens, o que pode ser impedido pela iluminação (horas do dia) e condições climáticas (cobertura das nuvens) (Silva *et al.*, 2021). Na Tabela 1 pode ser observado os satélites de sensores passivos mais utilizados em estudos devido a sua gratuidade e facilidade de acesso.

Tabela 1 - Características das bandas sensores Sentinel-2, Landsat-8 e MODIS, aplicáveis a estudos agroambientais.

Resolução Espacial	Faixa de Imageamento	Bandas Espectrais (BN) (μm)	Resolução Temporal
Sentinel-2/MSI	10 m	B2: 0,46–0,52 B3: 0,53–0,59 B4: 0,63–0,69 B8: 0,797–0,887	290 km 5 dias
Landsat-8	OLI: 30 m TIRS: 100m	B1: 0,43–0,45 B2: 0,45–0,51 B3: 0,53–0,59 B4: 0,64–0,69 B5: 0,85–0,88 B6: 1,570–1,650 B7: 2,11–2,29 B10: 10,6–11,19 B11: 11,5–12,5	185 Km 16 dias
Aqua/Terra	MODIS: 250 m	B1: 0,62–0,67 B2: 0,84–0,87	2330 km 1 a 2 dias

Fonte: Silva *et al.* (2021).

É da interação radiação solar-vegetação que acontece no processo da fotossíntese que se faz as detecções remotas gerando as imagens de satélite de uma localidade vegetada. Além disso, as características do solo também devem ser consideradas, uma vez que os teores de óxidos de ferro e de matéria orgânica, a textura, a umidade e a rugosidade são os principais fatores envolvidos na reflectância dos solos (Meneses *et al.*, 2019).

Por esse fato, diante de estudos com sensores remotos, sempre que possível, é importante unir conhecimento *in-situ* da área de estudo para que a interpretação seja convergente à realidade (Silva *et al.*, 2021).

Para processar as imagens fornecidas pelo sensoriamento remoto utiliza-se algoritmos, os quais são compostos por equações ajustadas para adequar técnicas para diferentes escalas (Diniz *et al.*, 2021). Os algoritmos mais utilizados para isso são o *Surface energy balance algorithms from the land* (SEBAL) e o *Mapping Evapotranspiration at high resolution with Internalized* (METRIC).

3.6.1 Mapping Evapotranspiration at high resolution with Internalized (METRIC).

Algoritmo proposto por Allen, Tasumi e Trezza (2007), o METRIC utiliza as mesmas fórmulas do SEBAL para obter o saldo de radiação, fluxo de calor no solo e fluxo de calor latente e sensível. Se diferencia do SEBAL em relação à escolha dos pixels âncoras e da sua extrapolação da ET que é dada para valores diários e sazonais (Silva *et al.*, 2021).

A evapotranspiração real (ET_r) é estimada através do fluxo de calor latente, que por sua vez é obtido como termo residual do balanço de energia na superfície (Equação 10).

$$\lambda E = R_n - G - H \quad \text{Equação (3)}$$

O saldo de radiação (R_n) é calculado como a diferença entre a irradiância solar incidente e radiação infravermelha distante refletida ou emitida pela superfície terrestre. Com isso, as equações utilizadas para cada componente do R_n estão descritas na tabela a seguir.

Tabela 2 - Equações utilizadas no algoritmo METRIC para o saldo de radiação (R_n)

(continua)

Componente	Equação
Albedo da superfície (α_s)	$\alpha_s = \sum_{b=1}^n (\rho_s, b. \omega b)$

(conclusão)	
Componente	Equação
Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)	$NDVI = \frac{(\rho_{iv} - \rho_v)}{(\rho_{iv} + \rho_v)}$
Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)	$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{iv} - \rho_v)}{L + (\rho_{iv} + \rho_v)}$
Índice de Área Foliar (IAF)	$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91}$
Emissividades (ε_s)	$\varepsilon_{snb} = 0,97 + 0,0033 \cdot IAF$ $\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF$
Temperatura da superfície (T_s)	$T_s = \frac{K_2}{L \left(\frac{\varepsilon_{snb} \cdot K_1}{L_{b,10}} + 1 \right)}$
Radiação de onda longa emitida pela atmosfera ($Lw \downarrow$)	$Lw \downarrow = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4$
Radiação de onda longa emitida pela superfície ($Lw \uparrow$)	$Lw \uparrow = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s$

$$Rn = K \downarrow (1 - \alpha) + Lw \downarrow - Lw \uparrow - (1 - \varepsilon_s) Lw \downarrow \quad \text{Equação (4)}$$

em que $K \downarrow$ é a irradiância solar incidente na superfície ($W m^{-2}$), α e ε_s são, respectivamente, o albedo e a emissividade da superfície; $Lw \downarrow$ e $Lw \uparrow$ são, respectivamente, a radiação infravermelha termal emitida pela atmosfera e pela superfície ($W m^{-2}$), calculados conforme descrito Allen, Tasumi e Trezza (2007).

No METRIC, o G é estimado para cada *pixel* por uma equação empírica, conforme proposto por Bastiaanssen (2000).

$$G = Rn \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98 NDVI^4) \right] \quad \text{Equação (5)}$$

Em que T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}C$) e $NDVI$ é o índice de vegetação por diferença normalizada ($NDVI$) calculado para cada *pixel*.

Para o calor sensível (H), estima-se com base na velocidade do vento e temperatura da superfície usando uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre s níveis.

$$H = \rho \cdot cp \cdot \frac{dT}{r_{ah}} \quad \text{Equação (6)}$$

Em que: ρ é a massa específica do ar (Kg.m^{-3}), cp o calor específico do ar ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$), dT a diferença de temperatura próxima à superfície (°C), e r_{ah} a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s.m^{-1}).

Nesse momento é que são selecionados dois pixels de condições extremas de temperatura e umidade dentro da área de estudo, denominados de pixels âncoras, pixels “quente” e “frio”. No METRIC, o pixel quente é escolhido em uma área de solo exposto com $\lambda E = 0$ e $H_q = (R_n - G)_q - \lambda E_q$. Já o frio é $\lambda E = 1,05 \times E_{Tr}$ e $H_f = (R_n - G)_f - \lambda E_f$.

A obtenção do fluxo de calor sensível, um elemento crucial na determinação da evapotranspiração, exige a perícia de um especialista, já que a seleção dos pixels âncoras pode levar a erros significativos na estimativa da ET.

Para agilizar o processo e minimizar imprecisões na obtenção da evapotranspiração, o método METRIC foi incorporado na plataforma *Google Earth Engine Evapotranspiration Flux* (EEFlux).

O projeto EEFLUX foi financiado pela Google Inc. e contou com o apoio de três instituições: University of Idaho (UI), University of Nebraska-Lincoln (UNL) e Desert Research Institute (DRI), além do suporte do USGS através da Landsat Science Team. Atualmente, o EEFLUX está disponível gratuitamente no link <https://eeflux-level1.appspot.com/>, oferecendo uma ampla coleção de imagens Landsat processadas desde 1984, com atualizações a cada 16 dias para o mesmo local.

Diversos estudos foram realizados utilizando os produtos do EEFLUX como o de Foolad et al. (2018) que compararam os valores da Evapotranspiração real pelo METRIC-EEFLUX (E_{Tr} -EEFLUX) e do METRIC padrão, encontrando assim valores similares. Ayyad et al. (2019) analisaram a E_{Tr} -EEFLUX em áreas agrícolas nas regiões do Delta do Nilo e do Vale do Nilo, constatando superestimação nas estimativas de E_{Tr} . Já Khan et al. (2019) compararam a E_{Tr} do EEFlux com medições de covariância de vórtice em quatro locais com cinco culturas anuais, e observaram um acordo razoável entre os dados. Enquanto no Brasil, o EEFLUX encontrou resultados satisfatórios ao estimar a variabilidade espacial do consumo de

água do milho (Costa *et al.*, 2020), da soja (Venancio *et al.*, 2020) e do eucalipto (Dias *et al.*, 2022).

CAPÍTULO 4 CONSUMO HÍDRICO DA MANGUEIRA NO NORDESTE DO PARÁ UTILIZANDO O MÉTODO DE RAZÃO DE BOWEN

Resumo

O monitoramento da evapotranspiração é fundamental para a agricultura, pois permite determinar a demanda hídrica de uma cultura, contribuindo assim para o seu cultivo sustentável no que se refere ao uso da água. Este estudo buscou estimar o consumo hídrico de um pomar de mangueira em Cuiarana, no nordeste do Pará, usando o Método de Razão de Bowen durante o período de duas safras no ano de 2021/2022 e 2022/2023. Constatou-se que as Safras 1 e 2 consumiram diariamente 4,59 mm e 4,84 mm de água, totalizando 702,3 mm e 739,74 mm, respectivamente. Com um consumo médio de 721 mm de água e uma contribuição de cerca de 185.958 m³ para o ciclo hidrológico local, o pomar tem um impacto significativo na dinâmica hídrica da região. Tais resultados demonstram a necessidade de monitoramento constante da evapotranspiração para a localidade, uma vez que fenômenos climáticos como La Niña influenciaram fortemente no regime de chuva, aumentando a taxa evaporativa no período estudado.

Palavras-Chaves: evapotranspiração; Bowen; *Mangifera indica* L.; Amazônia;

4.1 Introdução

A manga (*Mangifera indica*, L.), fruto tipicamente tropical, está em franca expansão global, com um mercado de exportação exigente em qualidade, impulsionado pela crescente demanda mundial e pela mudança nos hábitos alimentares dos países desenvolvidos devido ao reconhecimento da necessidade de uma alimentação saudável (Silva; Menezes, 2001).

A *Tommy Atkins*, uma variedade de manga de origem norte-americana, destaca-se entre várias outras pelo fato de ser a mais produzida e ter a maior participação no volume global de comercialização de mangas, isso se deve principalmente à sua coloração intensa, altas produções e resistência ao transporte em longas distâncias (Gazzola; Gründling; Aragão, 2020)

Apesar da notável resistência da mangueira à seca, estudos literários destacam que solos com baixa disponibilidade hídrica, resultantes de práticas inadequadas de irrigação, têm o potencial de prejudicar tanto o desenvolvimento do sistema radicular quanto o crescimento da parte aérea da planta (Prakash *et al.*, 2015). Isso, por sua vez, pode culminar na formação de frutos de qualidade inferior e na redução geral da produtividade. É essencial, portanto, adotar uma gestão precisa da irrigação para garantir o pleno potencial da mangueira.

Dessa forma, para que se tenha frutas com qualidade apreciada pelo mercado e se faça o uso racional dos recursos hídricos dentro da agricultura é necessário estimar a

Evapotranspiração da cultura (ET_c). A ET, como componente primordial do ciclo hidrológico, desempenha um papel importante na compreensão do balanço hídrico, variações climáticas e processos ecossistêmicos (Wanniarachchi; Sarukkalige, 2022).

Além disso, com a ET_c, é possível calcular o suprimento hídrico necessário, em lâmina de irrigação, que aquela cultura precisa para seus processos fisiológicos em um clima local, sendo possível monitorar e calcular o uso da água em seus diferentes períodos fenológicos (Sousa *et al.*, 2021).

Diversas abordagens podem ser empregadas para avaliar a evapotranspiração da cultura (ET_c), tais como lisimetria (Silber *et al.*, 2019), covariância de vórtices turbulentos (Prueger *et al.*, 2018), balanço da água do solo (Domínguez-Niño *et al.*, 2020) e balanço de energia por meio do método de razão de Bowen (MRB) (Souza *et al.*, 2016; Chebbi *et al.*, 2018).

Entre essas técnicas, o método micrometeorológico de balanço de energia, fundamentado na razão de Bowen, se destaca como uma opção prática e confiável para quantificar a ET_c (Wijewardana *et al.*, 2019). Ele oferece vantagens notáveis quando comparado a medições diretas (lisimetria), possibilitando medições contínuas e descomplicadas em extensas áreas sem afetar a superfície (Nizinski; Galat; Galat-luong, 2014). Adicionalmente, esse método demanda poucos parâmetros de entrada, o que o torna uma escolha mais econômica (Hu *et al.*, 2013).

Comparando os fluxos de calor sensível e latente obtidos pelo MRB e pelo método da covariância de vórtices turbulentos, Billesbach e Arkebauer (2012) observaram uma alta concordância nos valores, evidenciando a precisão e confiabilidade do MRB (Gavilán; Berengena, 2007).

Esse método é particularmente confiável em períodos curtos, quando há mínimos desvios nas leituras dos instrumentos, como indicado por Dicken, Cohen e Tanny (2013). No entanto, o MRB requer leituras constantes dos elementos climáticos essenciais para calcular a evapotranspiração, o que pode ser considerado uma desvantagem (Silva *et al.*, 2016). Além disso, ele apresenta limitações próximas ao nascer e ao pôr do sol, devido à baixa variação nos gradientes de temperatura e umidade do ar, conforme destacado por Souza *et al.* em 2018.

O MRB já foi utilizado para estudos do balanço de energia e ET com resultados promissores para diversas culturas como da cana-de-açúcar (Silva *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2012; Esteves *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2020), da banana (Teixeira *et al.*, 2002), do feijão caupi (Lima *et al.*, 2006; Paula *et al.*, 2019), da soja (Pierdoná *et al.*, 2019), do açaí (Sousa *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2023) e da manga (Azevedo, Silva e Silva., 2003; Teixeira; Bastiaanssen, 2012; Rodrigues; Souza; Lima, 2013; Souza *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2018).

Frente ao exposto, levando em consideração a importância econômica da manga para região e a preocupação com o uso da água na agricultura, o objetivo desta pesquisa é estimar do consumo hídrico de um pomar de mangueira *Tommy Atkins* situada em Cuiarana, nordeste do Pará, durante os meses que ocorrem suas safras.

4.2 Materiais e Métodos

4.2.1 Área de estudo

Figura 1 - Localização do sítio experimental de Cuiarana, nordeste do Pará



Fonte: Autor, 2023.

O local de estudo (Figura 1) está situado em uma área costeira do estado do Pará com média de 3.400 mm.ano⁻¹, sendo o mês mais chuvoso março, com 606 mm, e o mais seco, outubro com 22 mm (Amanajás; Braga, 2012). A Zona de Convergência Intertropical (ZIT), as linhas de instabilidade, e os fenômenos El Niño – Oscilação Sul (ENOS) e La Niña, são os principais influenciadores do padrão de chuvas na região do Nordeste Paraense (Medeiros, 2022).

O tipo de solo predominante na região do pomar é o Gleissolo Sálco Sódico (Santos *et al.*, 2011), o qual caracteriza-se por sua elevada concentração de sais podendo apresentar

sodicidade em decorrência de sua elevada PST ($\leq 15\%$) conforme pesquisa da Empresa Brasileira de Agropecuária (Embrapa, 2006). O Pomar foi plantado para fins comerciais em 1993, em fileiras orientadas no sentido Leste-Oeste, com espaçamento de 10 x 10 m, perfazendo uma área total de aproximadamente 25,5 ha (Lima *et al.*, 2012)

A localidade possui duas torres micrometeorológicas que armazenam dados de pressão (mb), umidade relativa do ar (%), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), velocidade e direção do vento (m/s) e precipitação, balanço de radiação, água no solo, etc., os quais serão coletados a cada 30 minutos. Foram utilizados o conjunto de dados da Torre micrometeorológica 1, os quais compreendem os períodos setembro a janeiro de 2021/2022 que será descrito como Safra 1 e setembro a janeiro de 2022/2023 que será denominado de Safra 2.

A torre possui 10m de altura e está equipada com sensores conectados, sendo utilizado um Datalogger (CR1000) conjuntamente com um adaptador de cartão e um cartão de memória flash com capacidade para 1gb, que são responsáveis pelo registro e armazenamento dos dados mensurados. A Tabela 3 descreve a instrumentação da torre utilizada para o monitoramento meteorológico.

Tabela 3 - Instrumentos utilizados no monitoramento micrometeorológico em um pomar de manga, cv. Tommy Atkins, Salinópolis, Pará, Brasil.

Parâmetro	Instrumento	Modelo/Fabricante/local	Altura (m)
Radiação solar incidente	Pyranometers	Kipp & Zonen (CMP3)	10 m
Saldo de radiação	Net Radiometer	Kipp & Zonen (NR-Lite)	8,5 m
Temperatura do ar	Thermohygrometer	Vaisala (HMP45A)	0,5 e 2,0 m acima do dossel
Umidade relativa do ar	Thermohygrometer	Vaisala (HMP45A)	0,5 e 2,0 m acima do dossel
Precipitação	Rain Gauge	Campbell Scientific Inc. (TB4)	10,5 m
Velocidade do vento	Anemômetro	Marine. 05106, Young	10,5 m

Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2016)

4.2.2 Estimativa da Evapotranspiração pelo Método de Razão de Bowen

Os dados coletados pelas torres micrometeorológicas 2 são parâmetros de entrada para determinar a Evapotranspiração (ET) do pomar de mangueira. Todos os cálculos foram realizados para cada período de 30 minutos com o auxílio de planilhas eletrônicas por meio da razão de Bowen na Equação 7:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad \text{Equação (7)}$$

As pressões de vapor do ar foram calculadas pelas Equações 9 e 8 (Tetens, 1930), e a razão de Bowen (Equação 7) será obtida a partir das diferenças de temperatura (ΔT) e de pressão real de vapor (Δe) entre os níveis 1 e 2 de instalação dos sensores.

$$es = 0,618 \times \exp \left[\frac{17,27 \times T}{T+237,3} \right] \quad \text{Equação (8)}$$

$$ea = es \times \frac{UR}{100} \quad \text{Equação (9)}$$

em que: es é a pressão de saturação do vapor do ar em kPa; T é a temperatura do ar nos níveis de medida em °C; UR é a umidade relativa do ar em %; ea é a pressão real de vapor do ar em kPa; γ é o coeficiente psicométrico, considerado igual a 0,67 kPa °C⁻¹ para a altitude média da região.

Com isso foi possível calcular o fluxo de calor latente e sensível conforme as equações abaixo:

$$\lambda E = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad \text{Equação (10)}$$

$$H = \lambda E \times \beta \quad \text{Equação (11)}$$

em que: λE é o fluxo de calor latente em W/m²; H é fluxo de calor sensível em W/m²; G é o fluxo de calor no solo, o qual foi adotado igual a zero quando não se há aparelho para mediação disponíveis conforme Allen *et al.* (1998); e β é a razão de Bowen.

Os valores da Evapotranspiração diária foram estimadas pela soma da ET que foi obtida a cada 30 minutos de coleta da torre meteorológica, junto com a informação obtida pelo calor latente de vaporização (λ), calculada por::

$$ETr = \frac{\lambda E \times 1800}{\lambda} \quad \text{Equação (12)}$$

em que: λE é o fluxo de calor latente em W/m^2 ; 1800 é o tempo em segundo equivalente ao intervalo de 30 minutos; e λ é o calor de vaporização que equivale a $2,46 \cdot 10^6$ J/Kg.

Foram adotados critérios de rejeição de dados conforme Perez *et al.* (1999), para evitar possíveis inconsistências nos valores da razão β . Esses critérios eliminam gradientes menores que a resolução dos sensores e estabelecem classes de erro para os valores de β que se aproximam de -1.

Tabela 4 - Condições necessárias para aceitação dos valores da razão de Bowen.

Energia disponível	Diferença de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxos de calor latente e sensível
$R_n - G > 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$\lambda E > 0$ e $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$\lambda E < 0$ e $H > 0$
$R_n - G < 0$	$\Delta e > 0$	$\beta < -1$	$\lambda E > 0$ e $H < 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta > -1$	$\lambda E < 0$ e $H \geq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

Fonte: Adaptado de Perez *et al.* (1999).

Tabela 5 - Classes de erro e condições para rejeição dos valores da razão de Bowen.

Classe de erro	Condições
A	$(R_n - G) > 0$, $\Delta e > 0$ e $\beta < -1 + \epsilon $
B	$(R_n - G) > 0$, $\Delta e < 0$ e $\beta > -1 + \epsilon $
C	$(R_n - G) < 0$, $\Delta e > 0$ e $\beta > -1 + \epsilon $
D	$(R_n - G) < 0$, $\Delta e < 0$ e $\beta < -1 + \epsilon $
E	Mudanças rápidas em T e e

Fonte: Adaptado de Perez *et al.* (1999)

4.3 Resultados e Discussões

4.3.1 Condições Ambientais

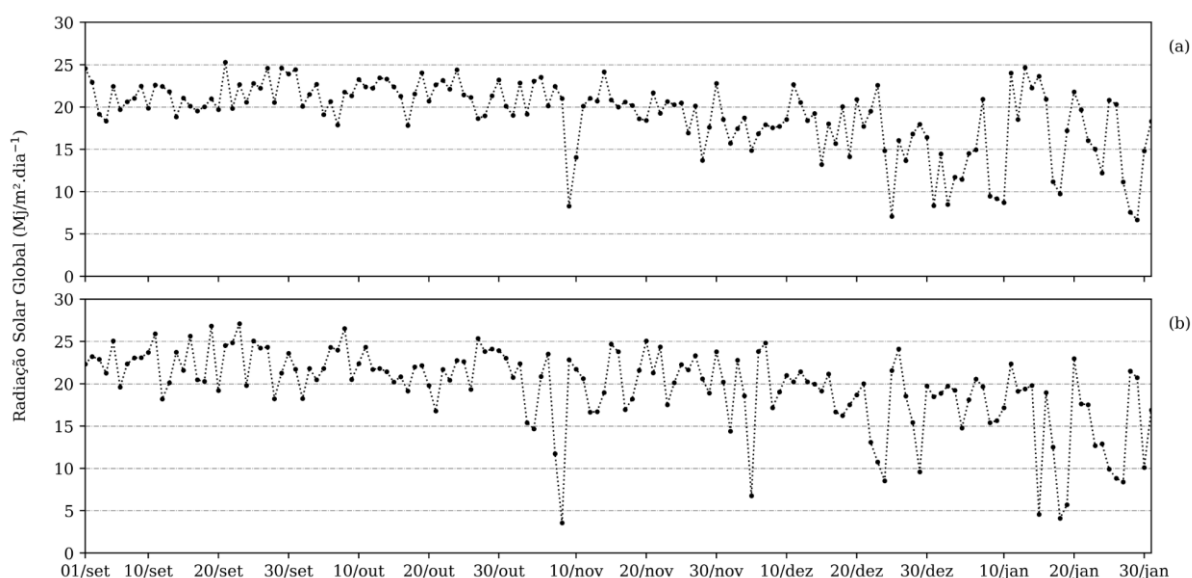
4.3.1.1 Radiação Solar Global Incidente

A região Amazônica recebe a maior quantidade de radiação solar ($36,7$ MJ/m².dia) no topo da atmosfera em dezembro/janeiro e a menor ($30,7$ MJ/m².dia) em Junho/Julho (Salati; Marques, 1984). Após a transmissão atmosférica, a radiação solar incidente (RSG) na superfície

é em média de 15,65-17,59 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}$, onde a maior radiação na superfície ocorre em setembro/outubro e a menor em dezembro/fevereiro (Fisch; Marengo; Nobre 1998).

Na região estudada, para a Safra 1, em setembro, a Radiação Solar Incidente (RSG) variou de 17,9 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$ a 25,29 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$. Outubro apresentou uma variação similar, com a RSG oscilando entre 17,81 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$ e 24,42 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$. Em novembro, houve uma queda notável na RSG, com valores tão baixos quanto 8,27 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$. No entanto, também houve picos de até 24,15 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$. Dezembro seguiu um padrão semelhante, com a RSG variando de 8,33 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$ a 22,63 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$. Finalmente, em janeiro, a RSG variou de 6,67 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$ a 24,64 $\text{MJ/m}^2.\text{dia}^{-1}$.

Figura 2 -. Radiação Solar Global Incidente nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).



Fonte: Autor, 2024.

Para a Safra 2, em setembro, a RSG variou de 18,20 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$ a 27,09 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$. Outubro apresentou uma variação similar, com a RSG oscilando entre 16,77 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}$ e 26,51 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$. Em novembro, houve uma queda notável na RSG, com valores tão baixos quanto 3,56 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$. No entanto, também houve picos de até 24,68 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$. Dezembro seguiu um padrão semelhante, com a RSG variando de 6,75 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$ a 24,80 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$. Finalmente, em janeiro, a RSG variou de 4,10 $\text{Mj/m}^2.\text{dia}^{-1}$ a 22,97 W/m^2 .

Comparando as duas safras, nota-se que a Safra 2 apresenta uma maior variabilidade nos valores de RSG, com picos mais altos e vales mais baixos, indicando uma maior instabilidade nas condições climáticas durante o período da Safra 2. Esta mesma grande variabilidade foi constatada no estudo de Souza *et al.* (2016) realizado no pomar que registrou

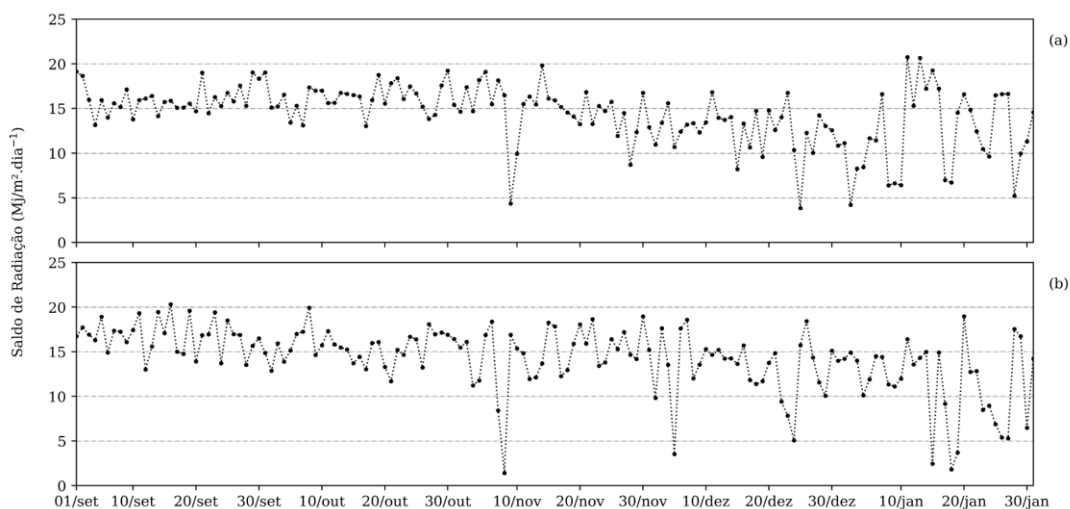
valor mínimo de $7,91 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}^{-1}$ e máximo de $26,7 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}^{-1}$ nas safras do ano de 2011/2012. Segundo os autores está grande variação ocorre devido a transição característica da região do período menos chuvoso para mais chuvoso.

O principal fator que pode ter influenciado a grande variabilidade durante esse período é a nebulosidade. A atmosfera tropical, possui como uma das suas principais características um elevado nível de vapor d'água devido à ET intensa, o que facilita a convecção e a formação de nuvens que refletem uma parte da radiação solar que atinge a superfície (Macedo; Fisch, 2018).

Por ser um dos principais fatores no clima amazônico, a RSG na região estudada irá influenciar os demais componentes meteorológicos analisados neste estudo. Alterações na composição e cobertura das nuvens podem influenciar a quantidade de luz solar que atinge a superfície da Terra. Isso pode resultar em mudanças na atmosfera, afetando aspectos como fluxos de calor, altura da camada limite, movimentos do ar, taxas de evaporação e padrões de circulação regional (Macedo; Fisch, 2018).

4.3.1.2 Saldo de radiação

Figura 3 -. Saldo de Radiação nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).



Fonte: Autor, 2024.

Para o Saldo de Radiação (R_n), o período da Safra 1 registrou um valor máximo de $19,14 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}^{-1}$ e mínimo de $13,16 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}^{-1}$. A Safra 2, registrou R_n máximo e mínimo de, respectivamente, $20,31 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}^{-1}$ e $13,01 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}^{-1}$.

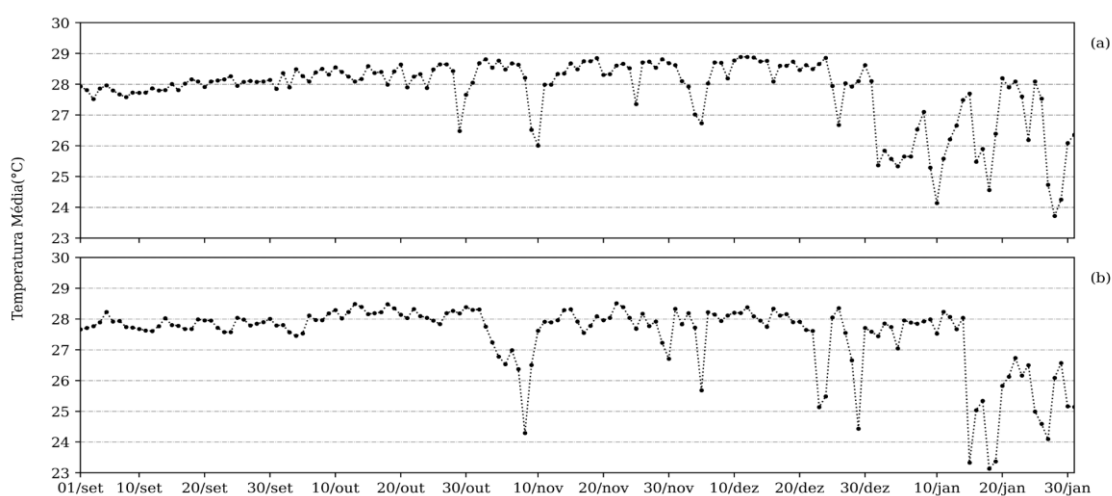
Os meses de novembro, dezembro e janeiro apresentam padrões semelhantes de variação na R_n em ambas as safras. É importante notar que existem dias em que a R_n é significativamente baixa, como no dia 8 de novembro na Safra 2, onde a R_n é de apenas $1,42$

Mj/m². Essas variações na Rn podem ser atribuídas a alta variabilidade de RSG na localidade, que no dia 8 de novembro de 2022 registrou um valor de 3,57 Mj/m².

4.3.1.3 Temperatura média diária

A temperatura do ar na Amazônia é estável ao longo do ano, com uma variação de 1-2°C, a temperatura média mensal atinge um pico de 26,5°C em novembro e um mínimo de 25,4°C em março na cidade de Belém do Pará (Fisch; Marengo; Nobre, 1998).

Figura 4 -. Temperatura média nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).



Fonte: Autor, 2024.

Para a região do pomar, em setembro, a Safra 1 começa com uma temperatura média diária de 27,93°C no dia 1, atingindo um pico de 28,14°C no dia 30. A Safra 2, por outro lado, começa com uma temperatura média diária de 27,67°C no dia 1, atingindo um pico de 28,23°C no dia 5.

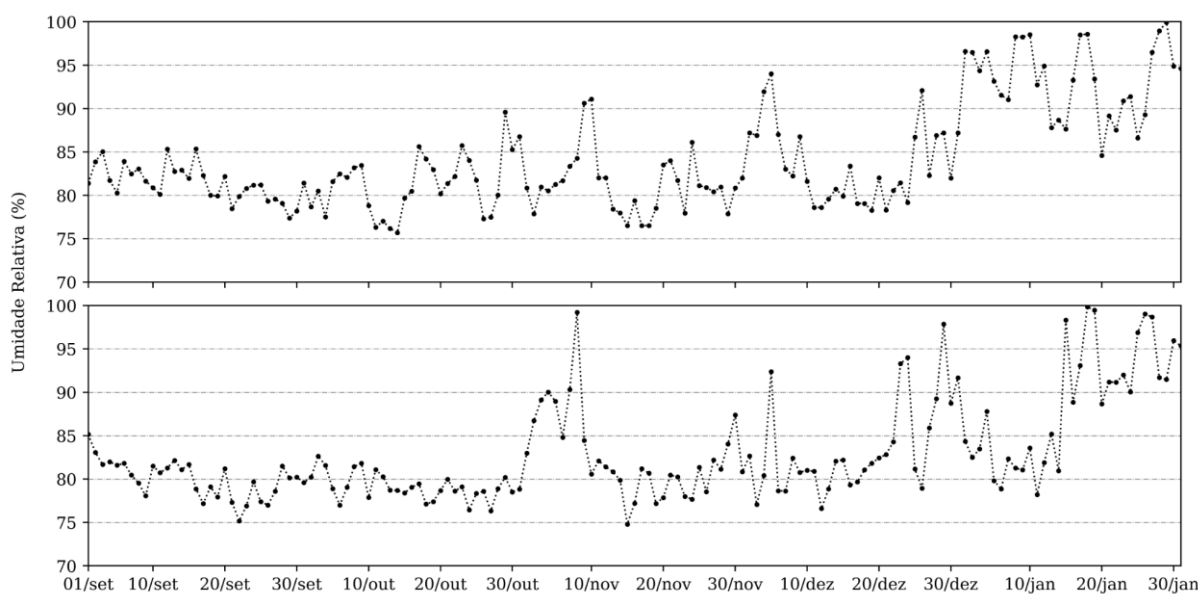
Em outubro, o período da Safra 1 apresentou uma temperatura média diária de 27,85°C no dia 1, aumentando para 28,59°C no dia 15 e diminuindo novamente para 28,05°C no dia 31. A Safra 2 começa o mês com uma temperatura média diária de 27,79°C, atingindo um pico de 28,49°C no dia 13.

Os meses de novembro, dezembro e janeiro apresentam padrões semelhantes de variação na temperatura em ambas as safras. É importante notar que existem dias em que a temperatura é significativamente baixa, como os dias 15, 18 e 19 que registraram temperaturas em torno dos 23 °C. Souza *et al.* (2016), também registraram essas mesmas temperaturas mínimas no período de maturação do fruto que compreende os meses de dezembro e janeiro.

4.3.1.4 Umidade relativa

Em setembro, a Safra 1 começa com uma UR de 81,38% no dia 1, atingindo um pico de 85,35% no dia 16. A Safra 2, por outro lado, começa com uma UR de 85,15% no dia 1, atingindo um pico de 85,15% também no dia 1.

Figura 5 -. Umidade relativa nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).



Fonte: Autor, 2024.

Em outubro, a Safra 1 apresenta uma UR de 81,43% no dia 1, aumentando para 85,63% no dia 17 e diminuindo novamente para 86,76% no dia 31. A Safra 2 começa o mês com uma UR de 79,59%, atingindo um pico de 82,64% no dia 3.

Os meses de novembro, dezembro e janeiro foram os meses de máxima UR chegando em picos de aproximadamente 100 %. Souza *et al.* (2016) constataram valores máximos de UR nesse período em que ocorreu a maturação do fruto.

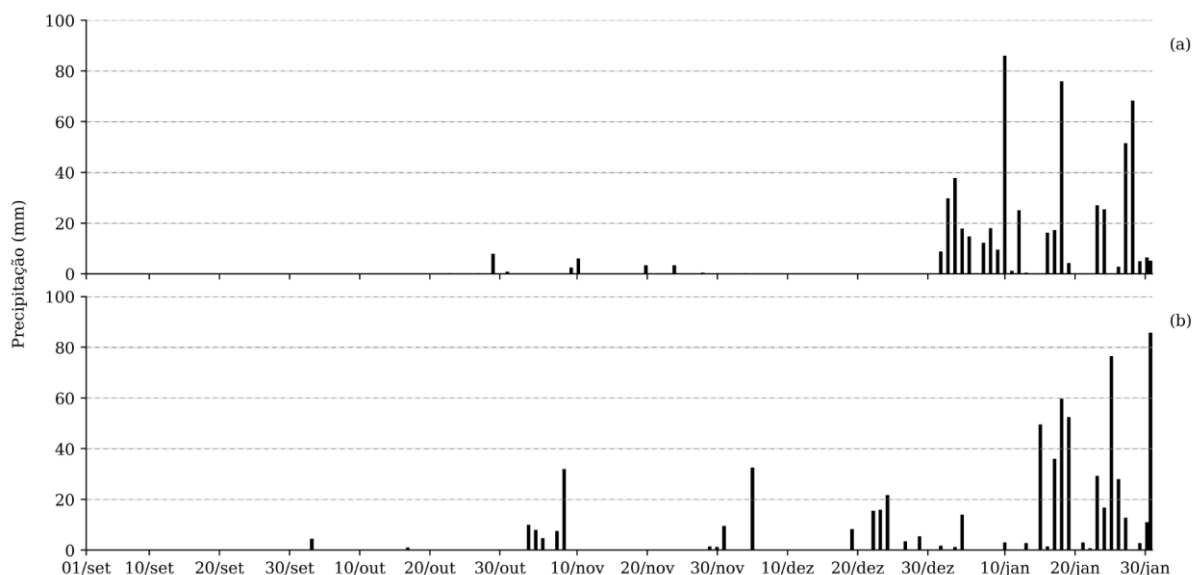
4.3.1.5 Precipitação

Em setembro, a Safra 1 e a Safra 2 não apresentaram precipitação, o que é comum para a região. A partir de outubro, ocorrem alguns eventos de precipitação que vão se intensificando de acordo com a transição para o período chuvoso. É importante notar que existem dias em que a precipitação é significativamente alta, como no dia 8 de novembro na Safra 2, onde a precipitação é de 32 mm.

Todos os elementos meteorológicos aqui estudados foram influenciados fortemente pela precipitação, uma vez que é um elemento que influencia as características e o comportamento

de outros componentes, como temperatura, umidade relativa e ventos entre outros (Fisch; Marengo; Nobre, 1998)

Figura 6 -. Precipitação nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).



Fonte: Autor, 2024.

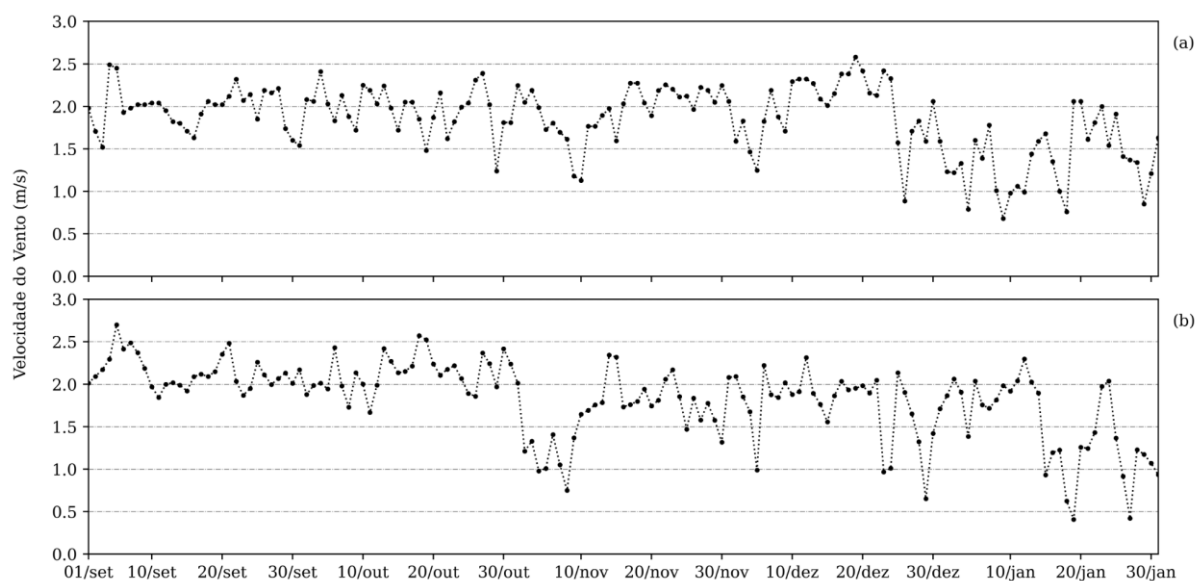
Durante os meses da Safra 1 houve um total de aproximadamente 593 mm de precipitação e para Safra 2 um total de 672 mm. Em ambas as safras, o período intenso de precipitação ocorreu entre os meses dezembro e janeiro. Observa-se que com o aumento das chuvas houve maior variabilidade e picos maiores de UR e menores picos de RSG, Rn e T. O mesmo comportamento foi encontrado por Souza *et al.* (2016) na região que observaram um acúmulo de 95,3% do total das chuvas nos períodos de maturação das safras.

4.3.1.6 Velocidade do vento

Para a Safra 1, a velocidade do vento parece ser relativamente estável, com uma média em torno de 2,0 m/s. Há uma ligeira tendência de aumento da velocidade do vento no início de dezembro, atingindo um pico de 2,7 m/s. A partir de então, a velocidade do vento diminui gradualmente até o final de janeiro, onde atinge um mínimo de 0,7 m/s.

Para a Safra 2, a velocidade do vento é geralmente mais baixa em comparação com a Safra 1, especialmente nos meses de outubro a janeiro. A velocidade do vento para a Safra 2 também mostra uma tendência de diminuição a partir de setembro, atingindo valores abaixo de 0,5 m/s em janeiro.

Figura 7 -. Velocidade dos ventos nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).



Fonte: Autor, 2024.

Em termos de comparação entre as duas safras, a velocidade do vento é geralmente maior na Safra 1 do que na Safra 2. A movimentação do ar implica no carregamento de calor adicional para regiões mais úmidas, intensificando a ET. Dessa forma, quanto maior a velocidade do vento, maior é o transporte de ar quente e seco para a área úmida, resultando em um aumento na ET dessa região (Allen *et al.*, 1998).

4.4 Consumo Hídrico e Evapotranspiração

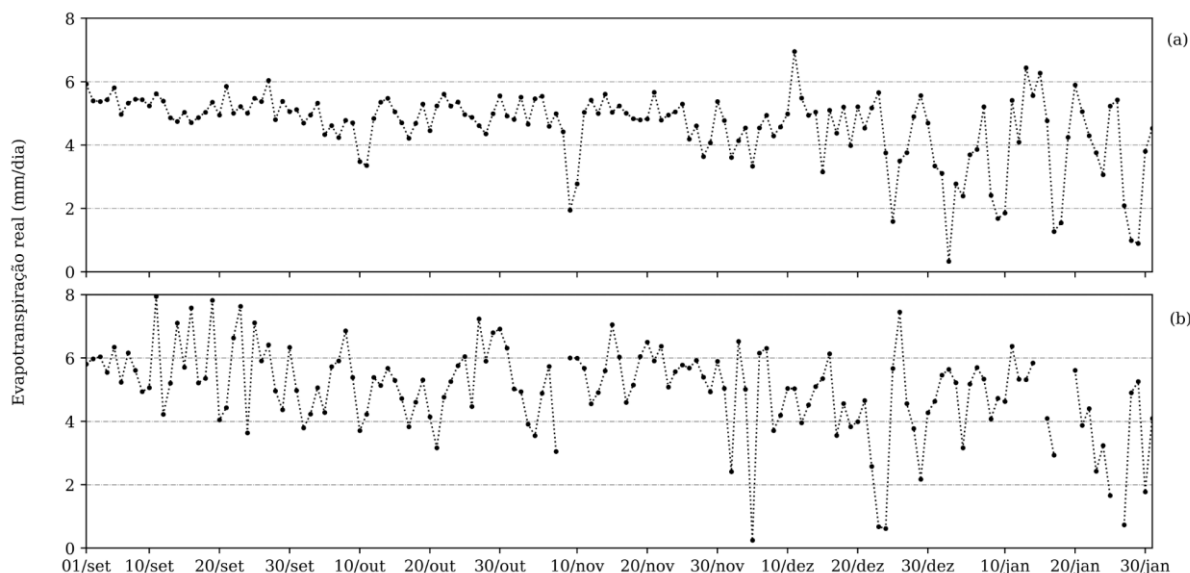
Ao aplicar os critérios de rejeição estabelecidos por Perez *et al.* (1999), constatou-se que 38,15% dos dados analisados durante o período da Safra 1 e 37,17% da Safra 2 apresentaram uma razão de Bowen consistente. Estes dados foram coletados nos horários de 7:30 da manhã e 17:00 da tarde.

Perez e colaboradores (1999) observaram que o MRB tende a ser mais suscetível a erros no final da tarde, à noite, ao amanhecer e nos períodos após precipitação ou irrigação. Em média, 40% dos dados coletados nesses momentos foram excluídos, pois são períodos em que ocorrem mudanças significativas no saldo de radiação e no fluxo de calor do solo, especialmente quando a razão de Bowen está entre -1,3 e -0,7.

A Evapotranspiração real (ET_r) da mangueira foi fortemente influenciada pela chuva na região. Durante a Safra 1 ocorreu uma maior estabilidade das condições climáticas associadas à falta de chuvas nos meses de Setembro a Outubro e maiores variações nos meses de dezembro e janeiro em decorrência do aumento das chuvas que se iniciaram em meados de outubro

intensificando no mês de janeiro. O maior pico de consumo hídrico neste período foi registrado no dia 11 de dezembro ($6,95 \text{ mm.d}^{-1}$) e o menor em 02 de janeiro ($0,33 \text{ mm.d}^{-1}$).

Figura 8 -.Evapotranspiração real do pomar de mangueira *Tommy Atkins* nos meses da Safra 1 (a) e Safra 2 (b).



Fonte: Autor, 2024.

Já para Safra 2, constatou-se uma maior variabilidade de ETr ao longo dos meses analisados em decorrência da maior instabilidade climática durante esse período registrando a maior ETr em 11 de setembro ($7,95 \text{ mm.d}^{-1}$) e menor em 05 de dezembro ($0,25 \text{ mm.d}^{-1}$). É importante destacar que para os dias 08 de novembro e 15, 18, 19 e 26 de Janeiro foi impossibilitada a estimativa da ETr pela método de Bowen em decorrência do baixo gradiente de temperatura e pressão de vapor uma vez que a UR nesse período se aproximou de 100% e VV abaixo de 1 m/s. Valores baixos de gradiente de pressão de vapor, resultantes da baixa velocidade do vento e do déficit hídrico do solo, levam a valores de Bowen que tornam a metodologia impraticável (Perez *et al.*, 1999). Para Viana *et al.* (2003), valores da velocidade do vento (VV) abaixo de 2,0 m/s apresentam pouca variação na temperatura e pressão de vapor da água resultando na redução do processo turbulento.

Conforme a Tabela 05 apresenta, a ETr média durante as Safras 1 e 2 foram respectivamente $4,59$ e $4,84 \text{ mm.d}^{-1}$, valores maiores do encontrado por Souza *et al.* (2016) que foram de 3,7 e 3,8 para as safras do ano de 2010/2011 e 2011/2012 para a mesma região e próximo dos valores encontrados por Azevedo, Silva e Silva (2003) ($4,3 \text{ mm.d}^{-1}$) e Silva *et al.* (2023) ($4,49 \text{ mm.d}^{-1}$) em um pomar de mangueira irrigada em Petrolina, Pernambuco.

Tabela 6. Evapotranspiração real (ETr) média e acumulada ao longo dos meses das Safras 1 e 2.

	Safra 1		Safra 2	
	mm.d ⁻¹		mm.d ⁻¹	
	Média	Acumulada	Média	Acumulada
Setembro	5,27	158,15	5,81	174,36
Outubro	4,82	149,38	5,19	160,88
Novembro	4,77	143,15	5,19	155,77
Dezembro	4,54	139,65	4,25	131,74
Janeiro	3,61	111,99	3,77	116,99
Média/Total	4,59	702,32	4,83	739,74

Fonte: Autor, 2024.

O total de água consumida pelo pomar durante os períodos analisados foi em média de 721 mm. Esse valor foi superior ao encontrado por Souza *et al.* (2016) (411 mm), Azevedo, Silva e Silva (2003) (551 mm) e Teixeira *et al.* (2008) (411,5 mm) para a mesma cultura aqui estudada e inferior ao de Silva *et al.* (2023) (1.445 mm).

Com relação aos valores superiores ao de Souza *et al.* (2016) se justificam pelo fato de que o presente estudo não levou em conta os períodos fenológicos como os autores fizeram, tal metodologia utilizada por eles acaba excluindo alguns dias fazendo com que os valores finais sejam menores.

Outro fator é a quantidade de chuva a qual teve uma maior disponibilidade durante a realização dessa pesquisa obtendo uma média acumulada de 632,5 mm, já em Souza *et al.* (2016) foi 288,1 mm. Por esse fato, as Safras 1 e 2 analisadas nas pesquisas obtiveram uma maior quantidade de água disponível, o que aumenta assim a taxa evaporativa.

No que se refere aos valores encontrados por Azevedo, Silva e Silva (2003), Teixeira *et al.* (2008) e Silva *et al.* (2023) a principal diferença se deu por esses estudos terem sido realizados em condições ambientais distintas, como maior disponibilidade de energia e condições de irrigação.

Em contrapartida, levando em conta a demanda atmosférica e os erros inerentes do MRB (Teixeira; Bastiaaseen, 2012), estudos realizados para mesma espécie *Tommy Atkins* resultaram

em consumo médio 3,3 mm.d-1 a 4,4 mm.d-1 (Azevedo, Silva e Silva, 2003; Silva *et al.*, 2001; Campos *et al.*, 2008), valores aproximados aos obtidos neste estudo.

Embora Souza *et al.* tenham realizado um estudo semelhante para a região do pomar em 2016, é necessário manter um monitoramento contínuo do consumo de água devido a fenômenos como El Niño, La Niña e a Zona de Convergência Intertropical (ZIT), que afetam diretamente o clima do nordeste amazônico. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2023), o fenômeno La Nina acarretou em anomalias positivas na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) entre os meses de dezembro a janeiro de 2022/2023, o que levou a um aumento no regime de chuvas, ultrapassando a média histórica para as regiões norte e nordeste do país. Isso pode ter afetado consideravelmente o consumo de água no pomar na região de Cuiarana e na aplicabilidade do MRB, o que necessita de maiores investigações em estudos futuros.

Assim, multiplicando-se o consumo médio pela área do pomar, extrapola-se que o toda a extensão do plantio de mangueira *Tommy Atkins* em Cuiarana contribui, em média, com cerca de 185.958 m³ para o ciclo hidrológico local. Esses resultados explicitam a importância de estudos da ET como componente do balanço hídrico e dessa área vegetada para o clima local e no conforto térmico da região conforme estudo de Medeiros (2022). As descobertas deste estudo fornecerão informações valiosas para entender a influência significativa do pomar na dinâmica hídrica da região, contribuindo para o manejo dos recursos hídricos e a produtividade agrícola.

4.5 Conclusão

A pesquisa sobre a evapotranspiração real (ET_r) da mangueira revelou a forte influência das condições climáticas, particularmente a precipitação, na dinâmica hídrica do pomar. A ET_r apresentou variabilidade notável entre as Safras 1 e 2, destacando a complexidade dos fatores que afetam o consumo hídrico. Foi observado que as Safras 1 e 2 consumiram, respectivamente, 4,59 e 4,84 mm por dia, resultando em um total de água consumida de 702,3 mm e 739,74 mm para cada safra. Infere-se que fenômenos meteorológicos como o La Niña tenha influenciado o regime de chuva contribuindo para o elevado consumo hídrico durante a Safra 2, tal fato evidencia a necessidade de um constante monitoramento da evapotranspiração na região.

Dessa forma, este estudo oferece uma compreensão aprofundada do ciclo hidrológico local e do papel desempenhado pelo pomar de mangueira *Tommy Atkins* em Cuiarana. Com um consumo médio de água de 721 mm e uma contribuição média de aproximadamente 185.958

m³ para o ciclo hidrológico local, o pomar exerce uma influência significativa na dinâmica hídrica da região.

Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 899-920, 2011.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines of computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 423-434, 2012.

BILLESBACH, D. P.; ARKEBAUER, T. J. First long-term, direct measurements of evapotranspiration and surface water balance in the Nebraska SandHills. **Agricultural and Forest Meteorology**, 156, 104–110. 2012. Doi:10.1016/j.agrformet.2012.01.001

BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by evaporation from any water surface. **Physical Review**, 27: 779-787. 1926. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.27.779>

CHEBBI, W.; BOULET, G.; LE DANTE, C. V.; LILI CHABAANE, Z.; FANISE, P.; MOUGENOT, B.; AYARI, H. Analysis of evapotranspiration components of a rainfed olive orchard during three contrasting years in a semi-arid climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, 256-257, 159–178. 2018. Doi:10.1016/j.agrformet.2018.02.020

CONSOLI, S.; MILANI, M.; CIRELLI, G.; BARBAGALLO, S.; MARZO, A.; VANELLA, D.; TOSCANO, A. Energy and water balance of a treatment wetland under mediterranean climatic conditions. **Ecological Engineering**, v. 116, 52–60, 2018. Doi: doi:10.1016/j.ecoleng.2018.02.029

AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 58, n. 3, p. 241–254. 2003. doi:10.1016/s0378-3774(02)00083-5

DICKEN, U.; COHEN, S.; TANNY, J. Examination of the Bowen ratio energy balance technique for evapotranspiration estimates in screenhouses. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, 397–405. 2013. Doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.11.001

DIMITRIADOU, S.; NIKOLAKOPOULOS, K. G. Evapotranspiration Trends and Interactions in Light of the Anthropogenic Footprint and the Climate Crisis: A Review. **Hydrology**, 08, 163.2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/hydrology8040163>

DOMÍNGUEZ-NIÑO, J. M.; OLIVER-MANERA, J.; GIRONA, J.; CASA DE SÚS, J. Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, v. 228, n. 105880., 2020. Doi: doi:10.1016/j.agwat.2019.105880.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa dos Solos. **Manual de método e análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p

ESTEVES, B. dos S.; SOUSA, E. F. D.; MENDONÇA, J. C.; LOUSADA, L. de L.; MARCIANO, C. R.; SIQUEIRA, D. P. Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar utilizando a razão de Bowen. **IRRIGA**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 441–452, 2014. Doi: 10.15809/irriga.2014v19n3p441.

EUSER, T.; LUXEMBURG, W. M. J.; EVERSON, C. S.; MENGISTU, M. G.; CLULOW, A. D.; BASTIAANSSEN, W. G. M. A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb temperature profiles. **Hydrol Earth Syst Sci**, v. 18 2021-2032, 2014. Doi: <https://doi.org/10.5194/hess-18-242021-2014>

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 28 n. 2, 101–101. 1998. Do: <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282126>

GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, n. 2, 127–140. 2006. Doi:10.1007/s00271-006-0040-1

GAZZOLA, R.; GRÜNDLING, R. D. P.; ARAGÃO, A. A. Produção e mercado internacional de manga. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**. V. 10, Nº 3, p. 81-87, 2020.

HU, S.; ZHAO, C.; LI, J.; WANG, F.; CHEN, Y. Discussion and reassessment of the method used for accepting or rejecting data observed by a Bowen ratio system. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 15, 4506–4510, 2013. Doi: doi:10.1002/hyp.9962.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – Inmet. Boletins prognóstico 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/boletinsprog#>. Acesso em 14 maio 2024.

IRMAK, S.; SKAGGS, K. E.; CHATTERJEE, S. A Review of the Bowen Ratio Surface Energy Balance Method for Quantifying Evapotranspiration and other Energy Fluxes. **Transactions of The Asabe**, [s.l.], v. 57, n. 6, p.1657-1674, 2014.

KANG, S.; ZHANG, B.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural Journal**, v.148, p.1629-1640, 2008.

LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. de A.; SILVA, I. de F. da. Estimativa da evapotranspiração do feijão caupi utilizando o modelo de Penman-Monteith. **Irriga**, v. 11, n. 4, p. 477–491, 2006. Doi: 10.15809/irriga.2006v11n4p477-491. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3271>. Acesso em: 29 ago. 2023.

MACEDO, A. dos S.; FISCH, G. Variabilidade Temporal da Radiação Solar Durante o Experimento GOAmazon 2014/15. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v 33, n 2, 353–365. 2018. Doi: <https://doi.org/10.1590/0102-7786332017>

MEDEIROS, L. R. **Uso do algoritmo sebal na estimativa da evapotranspiração em um pomar de mangas no nordeste paraense: uma abordagem socioambiental**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambientais, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. 2022. 79 f.

NIZINSKI, J. J.; GALAT, G.; GALAT-LUONG, A. Actual evapotranspiration and canopy resistance measurement of the savannah in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). **Russian Journal of Ecology**, v. 45, n. 5, 359–366. 2014. Doi: [doi:10.1134/s1067413614050191](https://doi.org/10.1134/s1067413614050191)

PAULA, A. C. P. de; SILVA, C. L. da; RODRIGUES, L. N.; SCHERER-WARREN, M. Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v 54, e00739. 2019. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00739>

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97 n.3, 141–150. 1999. Doi: [10.1016/s0168-1923\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(99)00080-5)

PIERDONÁ, H. L.; PAULA, A. C. P. de; SILVA, C. L. da S.; WARREN, M. S.; RODRIGUES, L. N. Comparação entre dois modelos usados na estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n.5, p.431-439, 2019. Doi: [10.13083/reveng.v27i5.877](https://doi.org/10.13083/reveng.v27i5.877)

PRAKASH, K.; VIJAYAKUMAR, R. M.; BALAMOCHAN, T. N.; SUNDHAR SINGH, S. D. Effect of drip irrigation regimes and fertigation levels on yield and quality of mango cultivar 'alphonso' under ultra high density planting. **Acta Horticulturae**, v. 1066, p. 147-150, 2015.

PRUEGER, J. H.; PARRY, C. K.; KUSTAS, W. P.; ALFIERI, J. G.; ALSINA, M. M.; NIETO, H.; WILSON, T. G.; HIPPS, L. E.; ANDERSON, M. C.; HATFIELD, J. L.; GAO, F.; LYNN, G.; MCKEE, L. G.; MCELNONE, A.; AGAM, N.; LOS, S.A. Crop water stress index of an irrigated Vineyard in the Central Valley of California. **Irrigation Science**, v.37, p.297–313. 2018. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0598-4>

RODRIGUES, J. C.; SOUZA, P. J. O. P. de; LIMA, R. T. de. Estimativa de temperaturas basais e exigência térmica em mangueiras no nordeste do estado do Pará. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.35 n.1, 143–150, 2013. Doi: [10.1590/s0100-29452013000100017](https://doi.org/10.1590/s0100-29452013000100017).

RUDNICK, D.R.; IRMAK, S. Impact of nitrogen fertilizer on maize evapotranspiration crop coefficients under fully irrigated, limited irrigation, and rainfed settings. **J. Irrig. Drain. Eng.** 140, 4014039. 2014.

SALATI, E.; MARQUES, J. Climatology of the Amazon region. In: SIOLI, H. (ed.). **The Amazon - limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin**. Dr. W. Junk Publishers, 1984. 763 p.

SANTOS, H. G. dos; CARVALHO JUNIOR, W. de; DART, R. de O.; AGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S. de; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. da S.; OLIVEIRA, A. P. de. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (Embrapa Solos. Documentos, 130.) 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123772/1/DOC-130-O-novo-mapa-de-solos-do-Brasil.pdf>. Acessado em 01 de junho de 2023.

SANTOS, M. A.; BASTOS LYRA, G.; DE SOUZA, J. L.; ARAÚJO FERREIRA JÚNIOR, R. Incertezas na estimativa da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen em cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo-AL. **Revista Multidisciplinar De Educação E Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, 108. 2020.

SILBER, A.; NAOR, A.; COHEN, H.; BAR-NOY, Y.; YECHIELI, N.; LEVI, M.; NOY, M.; PERES, D.; DUARI, K.; NARKIS, S.; ASSOULINE, S. Irrigation of “Hass” avocado: effects of constant vs. Temporary water stress. **Irrigation Science**, v.37, p.451–460, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00622-w>

SILVA, F. B. da J. ; SILVA, M. J. da; CARVALHO, H. F. de S.; SANTOS, C. V. B. dos; SILVA, T. G. F. da ; SOUZA, L. S. B. de; LEITÃO, M. de M. V. B. R.; MOURA, M. S. B. de. Water demand and water use efficiency in ‘Palmer’ mango cultivation in the Low-Middle São Francisco Valley. **Engenharia Agrícola**, v. 43, n.3 , 2023. Doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43n3e20220189/2023>

SILVA, A. V. C.; MENEZES, J. B. Caracterização físico-química da manga ‘Tommy Atkins’ submetida a aplicação de cloreto de cálcio pré-colheita e armazenamento refrigerado. **Scientia Agrícola**, v.58, n.1, p.67-72, jan./mar. 2001. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000100012>.

SILVA, L. D. B.; LYRA, G. B.; SILVA, J. B. G.; PINHO, C. F.; NASCENTES, A. L.; ALMEIDA, G. V.; FOLEGATTI, M. V. Desempenho do método do balanço de energia-razão de Bowen na estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 3, p. 516-529, 2016. Doi: <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v21n3p516-529>

SILVA, T. G. F. da; MOURA, M. S. B. de; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. de S.; GOMES JÚNIOR, W. F. Demanda hídrica e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 12, 1257–1265. 2011. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011001200007>

SILVA, T. G. F. DA; MOURA, M. S. B. de; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. de S.; GOMES JÚNIOR, W. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, 64–71. 2012. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100009>

SILVA, V. de P. R. DA.; GARCÊZ, S. L. A.; SILVA, B. B. da; ALBUQUERQUE, M. F. de; ALMEIDA, R. S. R. Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n. 5, 411–417. 2015. Doi: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p411-417>

SOUSA, A. M. L.; VITORINO, M. I; SOUZA, P. J. de O. P. de **Avaliação do IAF para uso na estimativa de produtividade da manga: Estudo de caso em Cuiarana - Pará. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba, PR. Anais..... São José dos Campos: INPE - SID, v. 1. p. 1-8. 2011.**

SOUSA, D. de P.; FERNANDES, T. F. S.; TAVARES, L. B.; FARIAS, V. D. de S.; LIMA, M. J. A. de; NUNES, H. G. G. C.; DEBORAH LUCIANY PIRES COSTA, D. L. P.; ORTEGA-FARIAS, S.; SOUZA, P. J. de O. P. Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. **Irrigation Science**, v. 39, n. 1, p. 5–22. 2021. Doi:10.1007/s00271-020-00710-2

SOUZA, P. J. D. O. P. D.; SILVA, E. R. R.; SILVA, B. B. D.; FERREIRA, T. R.; SOUSA, D. D. P.; LUZ, D. B. D.; ADAMI, M.; SOUSA, A. M. L. D.; NUNES, H. G. G. C.; FERNANDES, G. S. T.; PINTO, J. V. N.; FARIAS, V. D. DA S.; OLIVEIRA, I. A. DE; SILVA, S. A.S. da.; COSTA, J. F.; RUA, M. L.; COSTA, D. L. P.; MOURA, V. B.; LIMA, M. J. A. de; SANTOS, J. E. O.; SOUSA, A. J. S.; ORTEGA-FARIAS, S. Estimation of the Evapotranspiration of Irrigated Açaí (*Euterpe oleracea* M.), through the Surface Energy Balance Algorithm for Land—SEBAL, in Eastern Amazonia. **Water**, v. 15, n. 6, p.1073, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/w15061073>

SOUZA, P. J. de O. P. DE; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L. DE; SOUZA, E. B. de. Diurnal energy balance in a mango orchard in the northeast of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 537–546. 2018.doi:10.1590/0102-7786333012

SOUZA, P. J. O. P.; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A M L.; LIMA, R. T.; ROCHA, E. J. P.; ORTEGA-FARIA, S. S. Water requirement estimate for the reproductive period of mango orchards in the Northeast of the state of Pará, Brazil. **Rev Bras Frutic**, v.3, n. 311. 2016. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452016311>

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M. Five methods to interpret field measurements of energy fluxes over a micro-splinker irrigated mango orchard. **Irrigation Science**,v.30, p.13-28,2012.<https://doi.org/10.1007/s00271-010-0256-y>

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASSOI, L. H.; COSTA, W. P. L. B. da; SILVA, J. A. M. e; SILVA, E. E. G. da. Consumo hídrico da bananeira no Vale do São Francisco estimado pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 45-50, 2002.

TETENS, O. Über einige meteorologische Begriffe. Zeitschrift Geophysic, **Wurzburg**, v. 6, p. 297-309, 1930.

VOGEL, R. M.; LALL, U.; CAI, X.; RAJAGOPALAN, B.; WEISKEL, P. K.; HOOPER, R. P.; MATALS, N. C. Hydrology: The interdisciplinary science of water, **Water Resour. Res.**, 51, 4409–4430, 2015. Doi:10.1002/2015WR017049.

WANNIARACHCHI, S.; SARUKKALIGE, R. A review on rvapotranspiration estimation in agricultural water management: past, present, and future. **Hydrology** 2022, 9, 123. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070123>

WIJEWARDANA C.; ALSAJRI, F. A.; IRBY, J. T.; KRUTZ, L. J.; GOLDEN, B.; HENRY, W. B.; GAO, W.; REDDY, K. R. Physiological assessment of water déficit in soybean using midday leaf water potential and spectral features. **J. Plant Interact**, v.14, p. 533-543. 2019. Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/17429145.2019.1662499>

YANG, D.; YANG, Y.; XIA, J. Hydrological cycle and water resources in a changing worl: a review. **Geography and Sustainability**, 2 , 115–122. 2021.

CAPÍTULO 5 DESEMPENHO DO METRIC-EEFLUX NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DE UM POMAR DE MANGUEIRA NO NORDESTE DO PARÁ.

Resumo

A crescente preocupação com uso da água na agricultura exige estudos sobre métodos para estimar a evapotranspiração de áreas agrícolas mais eficazes e de fácil acesso à população. O Earth Engine Evapotranspiration Flux (METRIC-EEFLUX) na plataforma do Google Earth Engine (GEE), utiliza as fórmulas do algoritmo Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration (METRIC) para gerar mapas automático da evapotranspiração real (ET_r) de qualquer região no globo. Diante disso, a presente pesquisa teve por objetivo avaliar e classificar a estimativa da ET_r de três imagens geradas pelo METRIC-EEFLUX de um pomar de mangueira *Tommy Atkins*, no nordeste do Pará, tendo como referência o Método de Bowen. Através das análises estatísticas encontrou-se um coeficiente de correlação Pearson (r) igual a 1,00, índice estatístico de Willmont $dr = 0,10$, erro médio absoluto (MBE) igual a 1,02 mm.d⁻¹, o RMSE apontou um erro quadrático médio de 1,13 mm.d⁻¹ e o coeficiente de determinação (R^2) no valor de 1,00. Com isso, a classificação das estimativas para as três datas estudadas, segundo o coeficiente Pi, foi de “ruim”. Tais resultados implicam que, para cultura da manga na região amazônica, o METRIC-EEFLUX ainda necessita de uma melhor calibragem e aprimoramento, bem como de mais pesquisas que visam estudar sua aplicabilidade em condições amazônicas.

Palavras-Chaves: evapotranspiração; METRIC; EEFLUX; *mangifera indica L.*; Amazônia;

5.1 Introdução

Com aproximadamente 70% do uso de água na agricultura destinado à irrigação (Faostat, 2021), a preocupação global com a utilização sustentável desse recurso aumentou, devido não apenas ao crescimento da demanda, mas também à diminuição da disponibilidade hídrica decorrente de fatores climáticos, vegetacionais e edáficos (Zuazo *et al.*, 2021).

Nesse cenário, diversos estudos têm sido conduzidos para obter dados precisos de evapotranspiração (ET), uma vez que esses dados possibilitam a identificação do estresse hídrico nas culturas, o que se mostra fundamental para a otimização dos sistemas de irrigação, visando à redução do consumo de água (Pradipta *et al.*, 2022)

Graças à sua aplicação prática e custo acessível, a utilização de Sensoriamento Remoto (RS) permite a realização de estimativas da ET por meio de modelos de balanço de energia, nos quais a evaporação é determinada como um valor residual (Jensen; Allen, 2016).

Entre os modelos de estimativa da ET, *Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration* (METRIC) (Allen; Tasumi; Trezza, 2007), demonstrando eficácia em várias culturas como a do algodão (French *et al.*, 2015), do milho (Singh *et al.*,

2012), da soja (Choi *et al.*, 2009), da cana-de-açúcar (Zhang; Anderson; Whang, 2015), da banana (Diniz *et al.*, 2021) entre outros.

Esse modelo foi desenvolvido para fornecer estimativas precisas ET em áreas menores, através do uso de imagens de satélite e balanço de energia, e foi validado em várias regiões, tornando-se uma ferramenta confiável amplamente utilizada na gestão hídrica (Allen *et al.*, 2015; Tasumi *et al.*, 2005).

No entanto, a aplicação do modelo METRIC pode ser demorada por requerer conhecimento especializado para calibrar e executar modelo (Allen *et al.*, 2015; Reyes-González, 2018). Tal fato limita seu uso em pesquisas e aplicações práticas (Filgueiras *et al.*, 2019), gerando resultados diferentes em decorrência da falta de experiência do usuário (Foolad *et al.*, 2018).

Para superar essas limitações, foi criado o aplicativo *Earth Engine Evapotranspiration Flux* (METRIC-EEFLUX) na plataforma do *Google Earth Engine* (GEE) com base no modelo METRIC sendo sua calibração feita de forma automatizada, permitindo uma estimativa mais fácil e rápida da Evapotranspiração real (ET_r) e a geração de mapas de produtos intermediários como temperatura da superfície, albedo e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com base em imagens LANDSAT de resolução espacial de 30 metros desde 1984 até o presente (Allen *et al.*, 2015).

A principal diferença entre o METRIC-EEFLUX e o METRIC está no uso de fontes de dados meteorológicos. O METRIC utiliza dados horários de estações meteorológicas agrícolas para calcular a Evapotranspiração de Referência (ET_r) durante a calibração e estimar a evaporação de fundo causada por precipitações recentes. Por outro lado, o METRIC-EEFLUX utiliza dados meteorológicos *gridded* armazenados no *Earth Engine*. Nos Estados Unidos, ele utiliza dados horários do *North American Land Data Assimilation System* (Nldas) (Cosgrove *et al.*, 2003) para calibração e dados *gridded* do GridMet para determinar a evaporação de fundo (Abatzoglou, 2013). Para locais fora dos EUA, o METRIC-EEFLUX utiliza a análise operacional CFSv2 de seis horas (Yuan *et al.*, 2011; Saha *et al.*, 2013) e *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) para todos os cálculos (Saha *et al.*, 2010).

Os produtos do aplicativo EEFLUX-METRIC já foram utilizados em diversos estudos nacionais (Costa *et al.*, 2020; Venancio *et al.*, 2020; Dias *et al.*, 2022) e internacionais (Foolad *et al.*, 2018; Ayyad *et al.*, 2019; Khan *et al.*, 2019) encontrando resultados satisfatórios.

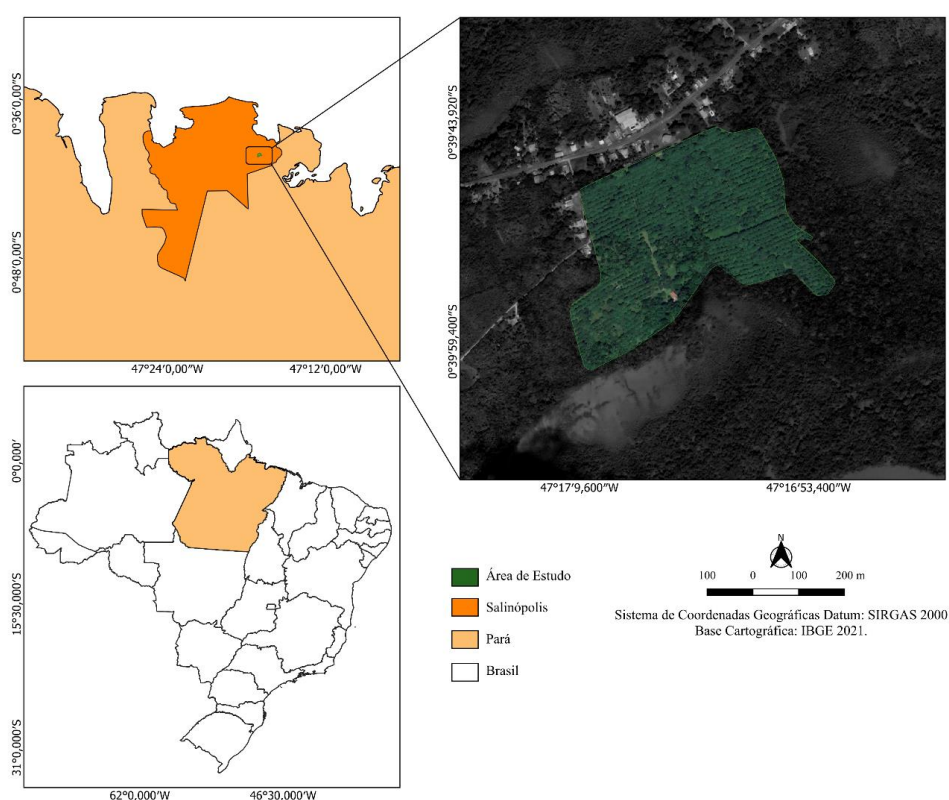
Portanto, apesar das várias avaliações feitas para o METRIC padrão quanto para o METRIC-EEFLUX, a estimativa automatizada de ET_r pelo EEFLUX deve ser minuciosamente examinada por si só (Kadam *et al.*, 2021).

Nesse contexto, este estudo visa avaliar o desempenho da estimativa da Evapotranspiração real através do algoritmo METRIC versão EEFLUX utilizando como parâmetro o Método de Razão de Bowen (MRB), em um pomar de mangueira em condições de sequeiro, localizado em Cuiarana, Nordeste do Pará.

5.2 Materiais e Métodos

5.2.1 Área de Estudo

Figura 9 - Localização do pomar de mangueira *Tommy Atkins* em Cuiarana, nordeste do Pará.



Fonte: Autor, 2023.

O sítio experimental encontra-se instalado em uma área de cultivo de mangueira, com aproximadamente 25,8 hectares, situada na localidade de Cuiarana (0°39'49.72''S, 47°17'03.41''O, 17m), município de Salinópolis, região nordeste do estado do Pará (Sousa; Vitorino; Souza, 2011), pertencente a Universidade Federal do Pará (UFPA) e Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA).

O local de estudo está situado em uma área costeira do estado do Pará com média de 3.400 mm ano⁻¹, sendo o mês mais chuvoso março, com 606 mm, e o mais seco, outubro com 22 mm (Amanajás; Braga, 2012). O tipo de solo predominante na região do pomar é o Gleissolo

Sálico Sódico (Santos *et al.*, 2011), o qual caracteriza-se por sua elevada concentração de sais podendo apresentar sodicidade em decorrência de sua elevada PST ($\leq 15\%$) (Embrapa, 2006).

5.2.2 Evapotranspiração real pelo *Earth Engine Evapotranspiration Flux*

As imagens do satélite Landsat 7 e 8 utilizadas neste estudo foram processadas no *Earth Engine Evapotranspiration Flux* (<https://eefluxlevel1.appspot.com>). A Evapotranspiração real (ET_r) é calculada como um residual do balanço de energia na superfície (Allen; Tasumi; Trezza, 2007), de acordo com a Eq. (12).

$$\lambda E = R_n - H - G \quad \text{Equação (12)}$$

Onde: λE é o fluxo de calor latente (energia consumida no processo de evapotranspiração), (W.m^{-2}); R_n é a radiação líquida, (W.m^{-2}); G é o fluxo de calor no solo, (W.m^{-2}); e H é o fluxo de calor sensível, (W.m^{-2}).

O METRIC-EEFLUX utiliza a banda térmica do Landsat 7 e 8 e as faixas de ondas curtas para calcular o balanço de energia na superfície, estimar a quantidade de vegetação, albedo e rugosidade. A versão atual do METRIC-EEFLUX incorpora calibração automática de imagens. O processo de calibração do METRIC-EEFLUX envolve a atribuição de valores para ET_{oF} nas áreas 'quente' e 'fria' (pixels) do espectro de temperatura da cena. O λE é estimado no exato momento da passagem do satélite para cada pixel, e a ET instantânea é então calculada dividindo o λE pela energia latente de vaporização, conforme a Equação (13):

$$E_{inst} = 3600 \frac{\lambda E}{\lambda \cdot \rho w} \quad \text{Equação (13)}$$

Onde: E_{inst} é a evapotranspiração instantânea, (mm.h^{-1}); 3600 converte segundos para horas; λ é o calor latente de vaporização, (J.kg^{-1}); e ρw é a densidade da água, ($\sim 1000 \text{ kg m}^{-3}$).

A ET é expressa em termos de Fração evaporativa (ET_{oF}), que representa a ET como uma fração da evapotranspiração de referência (ET_o). No EEFLUX, a ET_{oF} é calculada usando a referência da cultura de gramíneas, conforme a Eq. (4). A ET_{oF} é semelhante ao coeficiente de cultura (Kc) tradicionalmente chamado.

$$ET_{oF} = \frac{ET_{inst}}{ET_o} \quad \text{Equação (14)}$$

A ET_{oF} é utilizada como um meio para extrapolar a ET a partir da passagem instantânea do satélite para o período de 24 horas. Dessa forma, a ET diária é calculada multiplicando ET_{oF} para cada pixel individual pelo valor de ET_o do local e presumindo consistência entre ET_{oF} no momento da passagem do satélite e ET_{oF} para o período de 24 horas, conforme a Eq.

$$ETr = ET_{oF} \times ET_o \quad \text{Equação (15)}$$

As imagens foram escolhidas entre os períodos fenológicos da mangueira (Setembro a Janeiro) nos anos de 2021 e 2022. Baseado na metodologia de Kadam *et al.* (2021), para este estudo, foram baixadas as imagens da ET_{oF} livre de nuvens, essas imagens foram processados no software QGIS 3.81 e, após criar um arquivo *shapefile* da área de estudo, multiplicou-se pixel a pixel da imagem pela ET_o estimada pelo método de Penman-Monteith através de dados locais do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2022). Por meio da ferramenta “Estatísticas Zonais” encontrada na caixa de ferramentas do *software*, obteve-se os valores estatísticos da ETr para a área.

5.2.3 Evapotranspiração real pelo Método de Bowen

Para avaliar o desempenho da Evapotranspiração real pelo METRIC-EEFLUX foi utilizado a Evapotranspiração real diária dada pelo Método de Razão de Bowen (MRB) calculado para a data das imagens escolhidas.

Para isso foram utilizados dados de uma torre micrometeorológica localizadas na área de estudo que armazenam dados de pressão (mb), umidade relativa do ar (%), temperatura do ar (°C), velocidade e direção do vento (m/s) e precipitação, balanço de radiação, água no solo, etc., os quais foram coletados a cada 30 minutos.

As pressões de vapor do ar foram calculadas pelas Equações 16 e 17, e a razão de Bowen (Equação 18) será obtida a partir das diferenças de temperatura (ΔT) e de pressão real de vapor (Δe) entre os níveis 1 e 2 de instalação dos sensores.

$$es = 0,618 \times \exp \left[\frac{17,27 \times T}{T + 237,3} \right] \quad \text{Equação (16)}$$

$$ea = es \times \frac{UR}{100} \quad \text{Equação (17)}$$

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad \text{Equação (18)}$$

em que: e_s é a pressão de saturação do vapor do ar em kPa; T é a temperatura do ar nos níveis de medida em °C; UR é a umidade relativa do ar em %; e_a é a pressão real de vapor do ar em kPa; γ é o coeficiente psicométrico, considerado igual a 0,060 kPa °C⁻¹ para a altitude média da região.

Foram adotados critérios de rejeição de dados conforme Perez *et al.* (1999), para evitar possíveis inconsistências nos valores da razão β . Esses critérios eliminam gradientes menores que a resolução dos sensores e estabelecem classes de erro para os valores de β que se aproximam de -1.

Tabela 7 - Parâmetros para aceitação dos dados da Razão de Bowen

Energia disponível	Diferença de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxos de calor latente e sensível
$R_n - G > 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$\lambda E > 0$ e $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$\lambda E < 0$ e $H > 0$
$R_n - G < 0$	$\Delta e > 0$	$\beta < -1$	$\lambda E > 0$ e $H < 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta > -1$	$\lambda E < 0$ e $H \geq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

Fonte: Adaptado de Perez *et al.* (1999).

Tabela 8 - Categorias de Inconsistências e Critérios para Exclusão de Dados da Razão de Bowen

Classe de erro	Condições
A	$(R_n - G) > 0$, $\Delta e > 0$ e $\beta < -1 + \epsilon $
B	$(R_n - G) > 0$, $\Delta e < 0$ e $\beta > -1 + \epsilon $
C	$(R_n - G) < 0$, $\Delta e > 0$ e $\beta > -1 + \epsilon $
D	$(R_n - G) < 0$, $\Delta e < 0$ e $\beta < -1 + \epsilon $
E	Mudanças rápidas em T e e

Fonte: Adaptado de Perez *et al.* (1999).

A Equação 19 calculou o fluxo de calor latente (λE), com isso a Evapotranspiração real pelo método de Bowen (ETr-Bowen) pode ser calculada para cada período de 30 minutos

através da Equação 20. A evapotranspiração real diária será então obtida pela acumulação dos dados horários.

$$\lambda E = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad \text{Equação (19)}$$

$$ETr = \frac{\lambda E \times 1800}{\lambda} \quad \text{Equação (20)}$$

em que: Rn é o saldo de radiação em $W\ m^{-2}$; G é o fluxo de calor no solo em $W\ m^{-2}$; λE é o fluxo de calor latente em $W\ m^{-2}$. T é a temperatura do ar no nível 1 em $^{\circ}C$; ETr é a evapotranspiração real da cultura em $mm\ h^{-1}$; 1800 é o tempo em segundos correspondente ao intervalo de 30 minutos.

5.2.4 Validação e análise das estimativas

Para avaliar o desempenho das estimativas do modelo METRIC-EEFLUX foi escolhido o pixels correspondente a localização da torre meteorológica central do pomar. Dessa forma, as estimativas da ETr pelo METRIC-EEFLUX foram confrontados com a ETr dada pelo MRB pelo coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equação 22) e pelos índices estatísticos de Willmott (Equação 21), os quais representam respectivamente o grau de associação linear e concordância entre as estimativas do modelo e os dados observados (Willmott; Robeson; Matsuura, 2012) expressos na equação:

$$dr = \left\{ 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{2 \sum_{i=1}^n |X_i - \underline{X}|} \right] \right\}, \text{ quando } \sum_{i=1}^n |Y_i - X_i| \leq 2 \sum_{i=1}^n |X_i - \underline{X}| \quad \left[\frac{2 \sum_{i=1}^n |X_i - \underline{X}|}{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|} \right], \text{ quando } \sum_{i=1}^n |Y_i - X_i| > 2 \sum_{i=1}^n |X_i - \underline{X}| \quad \text{Equação (21)}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (|X_i - \underline{X}|)(|Y_i - \underline{Y}|)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (|X_i - \underline{X}|)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (|Y_i - \underline{Y}|)^2}} \quad \text{Equação (22)}$$

em que: Y_i é a evapotranspiração real diária estimada pelo METRIC-EEFLUX; X_i é a evapotranspiração real diária obtida pelo método da razão de Bowen; $\underline{X}$ é a média da evapotranspiração real diária obtida pelo método da razão de Bowen; $\underline{Y}$ é a média dos valores da evapotranspiração real diária obtida pelo METRIC-EEFLUX; N é o número de observações;

Também foi empregado a raiz do erro médio quadrático (RMSE) (Equação 22) fornece informações sobre o desempenho do modelo a curto prazo e indica o valor real do erro produzido pelas estimativas, embora não diferencie sobrestimativa de subestimativa. Quanto menor o valor obtido para RMSE, melhor o desempenho do modelo.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{N} \right]^{1/2} \quad \text{Equação (22)}$$

O indicador MBE (Equação 23) representa o desvio das médias e fornece informações quanto ao desempenho do modelo a longo prazo, com valores negativos indicando subestimativa e vice-versa. Quanto menor o valor absoluto de MBE, melhor é o desempenho do modelo (Stone, 1993).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)}{N} \quad \text{Equação (23)}$$

O índice de desempenho Pi (Equação 24) combina a precisão fornecida pelo coeficiente de correlação (r) e a concordância fornecida pelo índice dr de Willmott (Alvares *et al.*, 2013).

$$Pi = dr \times r \quad \text{Equação (24)}$$

O desempenho do modelo foi classificado conforme índice de desempenho (Pi) proposto por Alvares *et al.* (2013), de acordo com a Tabela 09.

Tabela 9 - Classificação do índice de desempenho (Pi)

(continua)	
Índice Pi	Desempenho
$Pi \geq 0,75$	Ótimo
$0,60 \leq Pi < 0,75$	Muito Bom
$0,45 \leq Pi < 0,60$	Bom
$0,30 \leq Pi < 0,45$	Tolerável
$0,15 \leq Pi < 0,3$	Pobre

(conclusão)	
Índice Pi	Desempenho
$0 \leq P_i < 0,15$	Ruim
$P_i < 0$	Muito ruim

Fonte: Alvares *et al.* (2013).

5.3 Resultados e Discussão

Foram escolhidas no total 3 imagens para o estudo entre os meses de setembro e novembro de 2022, período considerado seco na região, portanto, há baixa nebulosidade. Esses meses correspondem ao período fenológico da queda e floração desse plantio de mangueira na localidade (Rodrigues; Souza; Lima, 2013; Souza *et al.*, 2016).

Tabela 10 - Informações das imagens escolhidas através da plataforma EEFLUX.

Data	Satélite/Sensor	Identificador da Imagem	Cobertura da Nuvem	Hora
11/09/2022	Landsat-7/ETM	LE72230602022254ASN00	1%	11:42:53
28/09/2022	Landsat-7/ETM	LE72230612022271ASN00	17%	11:41:28
15/10/2022	Landsat-7/ETM	LE72230602022288ASN00	19%	11:39:02

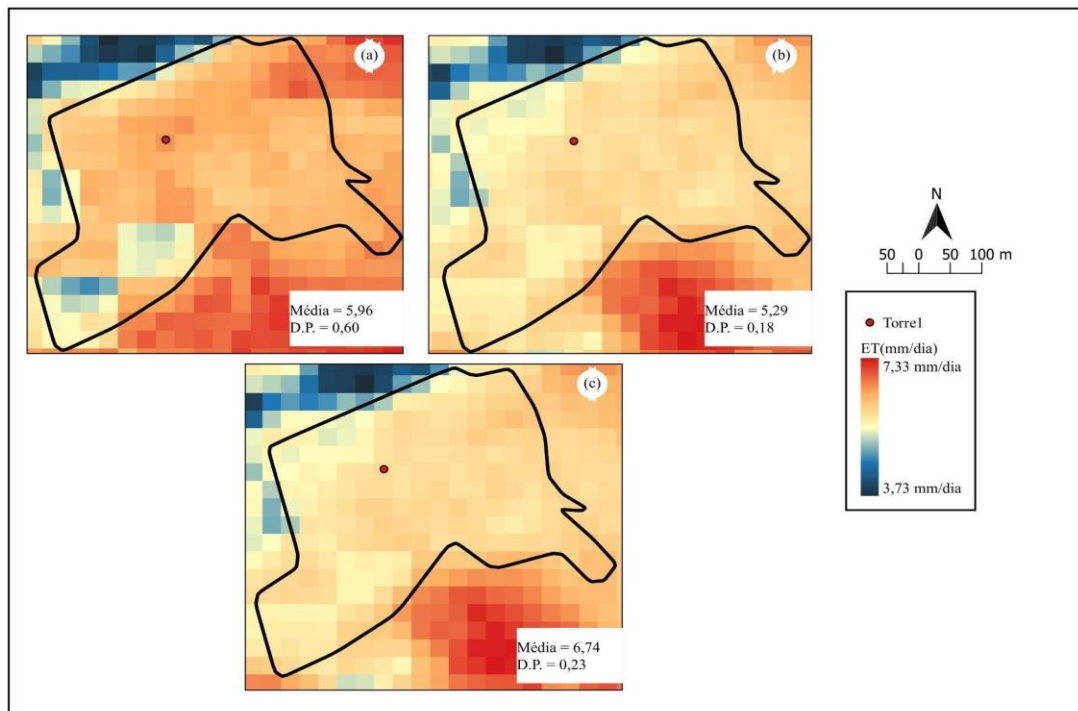
A Tabela 10 apresenta dados médios coletados por um torre instalada no centro do pomar que inclui temperatura do ar (Tar), umidade relativa (UR), radiação solar global incidente (RSG), saldo de radiação (Rn), velocidade do vento (VV), precipitação (PP) e evapotranspiração de referência (ET_o). Em 11/09/2022, houve um dia quente com moderada umidade, radiação solar expressiva e leve precipitação. No dia, 28/09/2022, houve um leve aumento da temperatura, aumento da umidade e menor radiação solar, indicando possivelmente um dia mais nublado e úmido. Já o dia 15/10/2022 foi o mais quente, com baixa umidade. Com base na ET_o, o dia com maior demanda hídrica para as plantas foi 11/09/2022, seguido pelo dia 15/10/2022, enquanto o menor foi o dia 28/09/2022.

Tabela 11 - Condições ambientais locais no momento da passagem dos satélites.

Data	Tar (°C)	UR (%)	RSG (Mj/m ² .d ⁻¹)	Rn (Mj/m ² .d ⁻¹)	V V (m/s)	PP (mm)	ET0 (mm)
11/09/2022	27,73	78,70	25,91	16,09	1,8	0,00	5,42
28/09/2022	27,85	81,49	18,23	13,54	2,1	0,00	4,05
15/10/2022	28,16	78,40	20,22	15,72	2,1	0,00	5,16

A Figura 10 nos apresenta a variabilidade espacial e temporal da Evapotranspiração real (ETr) conforme o EEFLUX. Nota-se que os valores médios de ETr são aproximados em decorrência das imagens usadas serem do mesmo período fenológico e da mesma época sazonal, com exceção do dia 15/10/2022 (FIGURA 10C) que resultou em uma ETr média de 6,74 mm.d⁻¹ o que pode ser explicada pela elevada Tar registrada para o dia (28,16 °C).

Figura 10 - Variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração real do pomar de mangueira Tommy Atkins.



Fonte: Adaptado de (Eeflux, 2023).

Nota: (a): 11/09/2022; (b): 28/09/2022; (c): 15/10/2022.

O maior Desvio Padrão (D.P.), que corresponde a maior variação espacial da ETr no pomar, foi do dia 11/09/2022 (0,60 mm.d⁻¹), enquanto o menor D.P. foi constatado no dia 28/09/2022 (0,18 mm.d⁻¹). Infere-se que a maior variação encontrada na Figura 10A foi

decorrente da baixa nebulosidade no momento da passagem do satélite e da elevada radiação solar incidente, o que evidenciou as áreas de solos expostas dentro da região do pomar. Já para a menor variação na Figura 10B pode ser explicada pela alta nebulosidade registrada para o dia.

As estimativas da ETr do método de Bowen foram aproximadas, por se tratarem do mesmo período fenológico. Com exceção do dia 28/09/2022 que registrou um valor de 4,61 mm.d⁻¹. Já a estimativa pelo EEFLUX obteve o mesmo comportamento, entretanto com um maior valor de ETr para o dia 15/10/2022 (6,84 mm.d⁻¹) em que o EEFLUX sobrestimou em o método de Bowen em 29,30 %. O menor erro relativo foi registrado para o dia 28/09/2022 (5,37 %).

Tabela 12 - Evapotranspiração real estimada pelo método de Bowen (ETr-Bowen) e Evapotranspiração real estimada pelo METRIC-EEFLUX (ETr-EEFLUX) e seus respectivos erros relativos.

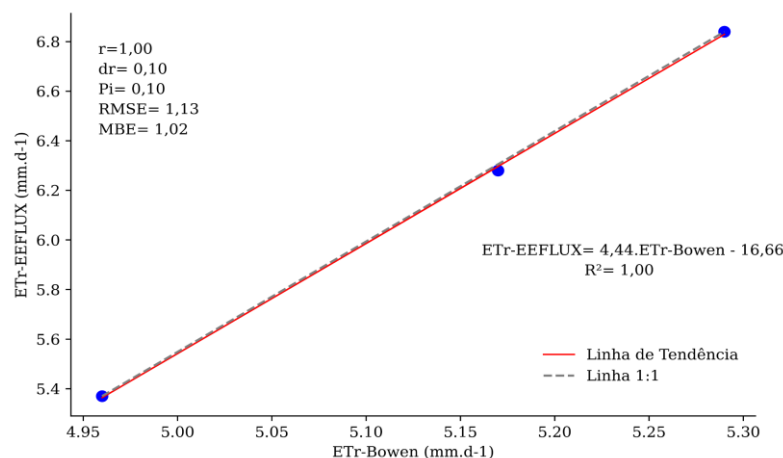
Datas	11/09/2022	28/09/2022	15/10/2022
ETr-Bowen (mm.d ⁻¹)	5,17	4,61	5,29
ETr-EEFLUX (mm.d ⁻¹)	6,28	5,37	6,84
Erro relativo (%)	21,47	16,48	29,30

A relação entre ETr-EEFLUX e a ETr-Bowen pode ser melhor analisada pelo gráfico de dispersão ilustrado na Figura 11, na qual é possível perceber correlação positiva entre os métodos.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) igual a 1,00 evidencia uma perfeita correlação positiva entre as estimativas da ETr-EEFLUX e o método da razão de Bowen. Esse coeficiente não contempla a concordância entre os métodos o que justifica o uso do índice dr de Willmott. Pelo índice dr = 0,10 é possível afirmar que a concordância entre a ETr-EEFLUX e a ETr-Bowen possui uma correspondência baixa, sugerindo divergências entre o conjunto de dados

O erro médio absoluto (MBE) apresentou índice de 1,02 e indica que de modo geral as estimativas do ETr-EEFLUX superestimaram a ETr- Bowen obtida pelo método da razão de Bowen em 1,02 mm na escala diária. O valor do índice dr foi menor e o MBE foi maior do encontrado por Costa *et al.* (2020) (dr = 0,22 e MBE = 0,81) na análise da estimativa do METRIC-EEFLUX tendo o como referência o método de Penman-Montheith da cultura do milho no estado do Mato Grosso

Figura 11 - Dispersão entre a ETr-EEFLUX e a ETr-Bowen ao redor da linha 1:1, coeficientes de correlação (r) e concordância (dr), índices estatísticos RMSE e MBE e desempenho P_i da cultura da mangueira *Tommy Atkins*



Para representar a magnitude média do erro entre os dois métodos, o indicador estatístico RMSE apresenta o valor real do erro produzido pelo modelo e é mais sensível a variações de grande magnitude. Dessa forma, o RMSE apontou um erro quadrático médio de $1,13 \text{ mm.d}^{-1}$ nas estimativas do ETr-EEFLUX, evidenciando variações moderadas entre a ETr-EEFLUX e a ETr-Bowen na escala diária. Foolad *et al.* (2018) em um estudo comparativo entre a estimativa da ETr pelo modelo METRIC-EEFLUX e o METRIC calibrado manualmente em diversas áreas no Nebraska nos EUA encontrou RMSE entre valores de $0,9$ a $1,1 \text{ mm.d}^{-1}$. Alsanjar e Cetin (2024) ao analisarem a ETr em um área irrigada no sudeste do Mediterrâneo da Turquia estimada pelo METRIC-EEFLUX e o METRIC convencional encontraram um RMSE igual a $1,22 \text{ mm.d}^{-1}$, valor aproximado ao desta pesquisa.

Através da equação de regressão linear e o coeficiente de determinação (R^2) pode-se observar que aproximadamente 100% ($R^2 = 1,00$) da variabilidade da ETr-EEFLUX pode ser explicada pela variabilidade da ETr-Bowen. Valor acima do encontrado por Nisa *et al.* (2021) ($R^2 = 0,65$) ao comparar a estimativa da ETr pelo METRIC-EEFLUX com medições de torre de fluxo *in situ* pelo sistema de *Eddy-covariance* em terras agrícolas de erva-doce, milho e azevém-trevo sul da Itália.

Utilizando a classificação P_i , o modelo METRIC-EEFLUX resultou em um valor de $0,10$, o que o classificou como desempenho "ruim". Costa *et al.* (2020) afirmam que, mesmo que se observem precisões baixas por meio do METRIC-EEFLUX, como no caso do estudo em questão, isso não significa que o modelo não seja confiável, uma vez que ele leva em consideração a variabilidade espaço-temporal, o que o diferencia de outras tecnologias. Conforme Foolad *et al.* (2018), a sobrestimação proporcionada pelo METRIC-EEFLUX pode

ser ocasionada pelo uso de dados meteorológicos em grades para a calibração automática do modelo, o que resulta em variações nos valores de $ET_{o_{TF}}$ e na ETr estimada para as imagens.

Além disso, a plataforma ressalta que em áreas como a região amazônica, ainda há uma limitada disponibilidade de pontos apropriados para calibração. Diante desse cenário, é crucial que os usuários exerçam maior cautela ao interpretar os resultados. Nesse contexto, enfatiza-se a importância de conduzir mais estudos utilizando o METRIC-EEFLUX especificamente para essa região, o que pode contribuir significativamente para o aprimoramento contínuo da plataforma. Adicionalmente, as lacunas existentes nas imagens L7 afetam significativamente os produtos locais gerados, necessitando com urgência de um protocolo de preenchimento (Nisa *et al.*, 2021). Salienta-se como um fator limitante e influenciador nos resultados encontrados a escassez de imagens livres de nuvens e dados disponíveis pelo INMET para o período analisado.

Em termos gerais, é de grande valia a acessibilidade da estimativa da ETr através da plataforma METRIC-EEFLUX. Embora muitos estudos destacam sua eficiência, para a cultura da manga na região amazônica o METRIC-EEFLUX ainda necessita de melhor calibração. Swelam *et al.* (2019) destaca que discrepâncias sutis na magnitude da ETr podem ter impactos significativos nas avaliações das necessidades hídricas das culturas em larga escala.

Assim, este estudo destaca áreas críticas para aprimoramentos futuros e enfatiza a importância contínua da pesquisa na busca por uma avaliação mais precisa e abrangente das demandas hídricas em diferentes regiões e culturas.

5.4 Conclusão

A análise da evapotranspiração real (ETr) através do EEFLUX revelou uma variabilidade espacial e temporal notável, evidenciando valores médios aproximados, exceto por uma exceção pontual. A alta variação espacial em determinado dia sugere a influência de condições meteorológicas específicas, como a presença de nuvens e radiação solar elevada, destacando áreas de solo exposto no pomar. A comparação com o método de Bowen revelou discrepâncias, especialmente em dias específicos, indicando a necessidade contínua de aprimoramento do modelo METRIC-EEFLUX.

Ao empregar métricas como o coeficiente de correlação de Pearson e o índice de Willmott, observamos uma forte correlação positiva, mas também uma correspondência baixa entre as estimativas da ETr -EEFLUX e do método de Bowen. O erro médio absoluto indicou uma tendência de superestimação da ETr -EEFLUX em relação ao método de Bowen, com variações moderadas evidenciadas pelo RMSE. Embora o desempenho do modelo METRIC-

EEFLUX tenha sido classificado como "ruim" pela classificação Pi, é importante considerar a abordagem espaço-temporal única do METRIC-EEFLUX, que o diferencia de outras tecnologias.

Os desafios identificados, como a escassez de pontos adequados para calibração na região amazônica e as lacunas nas imagens, ressaltam a importância de estudos específicos para aprimorar o METRIC-EEFLUX nesses contextos. O reconhecimento das limitações e a busca por melhores calibrações são passos fundamentais para fortalecer a confiabilidade do modelo, especialmente em ambientes agrícolas específicos, como o pomar de manga na região estudada. Este estudo destaca a necessidade contínua de pesquisas para aprimorar a precisão das estimativas hídricas em diferentes regiões e culturas, fornecendo insights valiosos para a gestão eficaz dos recursos hídricos.

Referências

- ABATZOGLOU, J. T. Development of gridded surface meteorological data for ecological applications and modelling. **International journal of climatology**, v. 33, n. 1, p. 121-131, 2013.
- ALLEN, R. G.; MORTON, C.; KAMBLE, B.; KILIC, A.; HUNTINGTON, J.; THAU, D.; GORELICK, N.; ERICKSON, T.; MOORE, R.; TREZZA, R.; RATCLIFFE, I.; ROBISON, C. EEFlux: A Landsat-based Evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015; pp. 1–11.
- 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**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.
- ALSANJAR, O.; CETIN, M. Comparison of actual evapotranspiration by the google earth engine evapotranspiration flux (EEFlux) to the METRIC model using remote sensing data and in-situ climate observations. **BIO Web of Conferences**, v 85, 01073. 2024. Doi: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248501073>.
- ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; MECIKALSKI, J. R.; TORN, R. D.; KUSTAS, W.P.; BASARA, J. B. A Multiscale Remote Sensing Model for Disaggregating Regional Fluxes to Micrometeorological Scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 5, n. 2, p. 343-363, 2004. Doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)0052.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541(2004)0052.0.co;2).
- AYYAD, S.; AL ZAYED, I. S.; HA, V. T. T.; RIBBE, L. The performance of satellite-based actual evapotranspiration products and the assessment of irrigation efficiency in Egypt. **Water (Switzerland)**, v 11. 2019. Doi: <https://doi.org/doi:10.3390/w11091913>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, p. 407-427, 2013.

CALDAS, M. M.; WALKER, R.; SHIROTA, R.; PERZ, S.; SKOLE, D. Ciclo de vida da família e desmatamento na Amazônia: combinando informações de sensoriamento remoto com dados primários. **Revista Brasileira de Economia**, v.57 n. 4. 2003. Doi:10.1590/S0034-71402003000400002.

CHOI, M.; KUSTAS, W. P.; ANDERSON, M. C.; ALLEN, R. G., LI, F.; KJAERGAARD, J. H. An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, U.S.) during SMACEX. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 12, p. 2082–2097. 2006. Doi:10.1016/j.agrformet.2009.07.002

COSGROVE, B. A.; LOHMANN, D.; MITCHELL, K. E.; HOUSER, P. R.; WOOD, E. F.; SCHAAKE, J. C.; ROBOCK, A.; MARSHALL, C.; SHEFFIELD, J.; DUAN, Q.; LUO, L.; HIGGINS, R. W.; PINKER, R. T.; TARPLEY, J. D.; MENG, J. Real-time and retrospective forcing in the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) project. **J. Geophys. Res. Atmospheres**, 108, 2003. Doi:10.1029/2002JD003118.

COSTA, J. de O.; JOSÉ, J. V.; WOLFF, W.; OLIVEIRA, N. P. R. de; OLIVEIRA, R. C.; RIBEIRO, N. L.; COELHO, R. D.; SILVA, T. J. A. DA; BONFIM-SILVA, E. M.; SCHLICHTING, A. F. Spatial variability quantification of maize water consumption based on Google EEflux tool. **Agricultural Water Management**. v 232, 2020. Doi: 106037. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106037>

DINIZ, R. R. S.; CORDÃO, M. A.; GUERRA, H. O. C.; OLIVEIRA, C. W. Evapotranspiração real da banana-nanica determinada pelo algoritmo METRIC no semiárido do Ceará, **Irriga**, v. 26, n. 3, p. 701–716, 2021. Doi: 10.15809/irriga.2021v26n3p701-716

F. AND A. ORGANIZATION OF THE U. N. AQUASTAT - FAO. Global Information System on Water and Agriculture. Disponível em: <https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use>. Acesso em: 3 abr. 2022

FOOLAD, F.; BLANKENAU, P.; KILIC, A.; ALLEN, R. G.; HUNTINGTON, J. L.; ERICKSON, T. A.; OZTURK, D.; MORTON, C. G.; ORTEGA, S.; RATCLIFFE, I.; FRANZ, T. E.; THAU, D.; MOORE, R.; GORELICK, N.; KAMBLE, B.; REVELLE, P.; GARCÍA-TEJERO, I. F.; DURÁN, Z. V. H. Water scarcity and sustainable agriculture in semiarid environment: tools, strategies and challenges for woody crops. **Academic Press Elsevier**, London, UK, 582 p. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - Inmet. Tabela de Estações 2022. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A001>. Acesso em: 20 ago. 2024.

FRENCH, A. N.; HUNSAKER, D. J.; THORP, K. R. Remote sensing evapotranspiration over cotton using TSEB and METRIC energy balance model. **Remote Sensing of Environment**, v. 158, p. 282-294, 2015.

JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G. (Eds.). **Evaporation, evapotranspiration, and water requirements for irrigation**: task committee for the revision of manual 70. 2. ed. Manuais e relatórios da ASCE sobre práticas de engenharia, n. 70. [S.l.]: ASCE, 2016. 744 p.

KADAM, S. A.; STÖCKLE, C. O.; LIU, M.; GAO, Z.; RUSSELL, E. S. Suitability of Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) Estimation of Evapotranspiration in Rainfed Crops. **Remote Sensing**. v 13, n 19, 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs13193884>

KHAN, A.; STÖCKLE, C. O.; NELSON, R. L.; PETERS, T.; ADAM, J. C.; LAMB, B.; CHI, J. S.; VALDO, S. Estimating biomass and yield using metric evapotranspiration and simple growth algorithms. **Agronomy Journal**. v 111, n 2, 536–544.. 2019
Doi: <https://doi.org/doi:10.2134/agronj2018.04.0248>

NISA, Z.; KHAN, M.S.; GOVIND, A.; MARCHETTI, M.; LASSERE, B.; MAGLIULO, E.; MANCO, A. Evaluation of SEBS, METRIC-EEFlux, and QWaterModel actual evapotranspiration for a mediterranean cropping system in Southern Italy. **Agronomy**, v. 11, 345.2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy11020345>

PRADIPTA, A.; SOUPIOS, P.; KOURGIALAS, N.; DOULA, M.; DOKOU, Z.; MAKKAWI, M.; ALFARHAN, M.; TAWABINI, B.; KIRMIZAKIS, P.; YASSIN, M. Remote sensing, geophysics, and modeling to support precision agriculture—Part 2: irrigation management. **Water**, v. 14, n. 7, p. 1157, 4 abr. 2022.

REYES-GONZÁLEZ, A.; KJAERGAARD, J.; TROOIJEN, T.; HAY, C.; AHIABLAHE, L. Estimation of crop evapotranspiration using satellite remote sensing-based vegetation Index. **Hindawi Advances in Meteorology**, v. 18, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1155/2018/4525021>

SANTOS, H. G. dos; CARVALHO JUNIOR, W. de; DART, R. de O.; AGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S. de; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. da S.; OLIVEIRA, A. P. de. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (Embrapa Solos. Documentos, 130.) 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123772/1/DOC-130-O-novo-mapa-de-solos-do-Brasil.pdf>. Acessado em 01 de junho de 2023.

SAHA, S.; MOORTHY, S.; PAN, H.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; KISTLER, R.; WOOLLEN, J.; BEHRINGER, D.; LIU, H.; STOKES, D.; GRUMBINE, R.; GAYNO, G.; WANG, J.; HOU, Y.; CHUANG, H.; JUANG, H. H.; SELA, J.; IREDELL, M.; TREADON, R.; KLEIST, D.; VAN DELST, P.; KEYSER, D.; DERBER, J.; EK, M.; MENG, J.; WEI, H.; YANG, R.; LORD, S.; VAN DEN DOOL, H.; KUMAR, A.; WANG, W.; LONG, C.; CHELLIAH, M.; XUE, Y.; HUANG, B.; SCHEMM, J.; EBISUZAKI, W.; LIN, R.; XIE, P.; CHEN, M.; ZHOU, S.; HIGGINS, W.; ZOU, C.; LIU, Q.; CHEN, Y.; HAN, Y.; CUCURULL, L.; REYNOLDS, R. W.; RUTLEDGE, G.; GOLDBERG, M. The NCEP Climate forecast system reanalysis. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** v 91, 1015–1058, 2010. Doi:10.1175/2010BAMS3001.1.

SAHA, S.; MOORTHY, S.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; BEHRINGER, D.; HOU, Y.; CHUANG, H.; IREDELL, M.; EK, M.; MENG, J.; YANG, R.; MENDEZ, M. P.; VAN DEN DOOL, H.; ZHANG, Q.; WANG, W.; CHEN, M.; BECKER, E. The NCEP Climate forecast system version 2. **J. Clim.** v 27, 2185–2208, 2013. Doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1.

SHIMABUKURO, Y. E. HOLBEN, B. N.; TUCKER, C. J. Fraction images derived from NOAA AVHRR data for studying the deforestation in the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**. v. 15, n.3, p. 517-520, 1994.

- SILVA, T. T. S. GUERRA, H. O. C., SILVA, B.B., SANTOS, C. L. M., GUIMARÃES, J.P.; SANTOS J. Evapotranspiration of banana tree using the SEBAL algorithm in an irrigated perimeter from the Northeastern Brazil. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, Campina Grande, PB. v.25, n.3, p.149-155, 2021.
- SINGH, R. K.; LIU, S.; TIESZEN, L. L.; SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; Estimating seasonal evapotranspiration from temporal satellite images. **Irrigation Science**, v. 30 p. 303-313. 2012.
- SWELAM, A.; GOVIND, A.; ABDALLAH, M.; STEDUTO, P.; TAHA, A. **Validation of remote-sensing evapotranspiration data of selected crops in the nile delta. In:** Proceedings of the 3rdWorld Irrigation Forum (WIF3), Bali, Indonesia, 1–7 September 2019.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97 n.3, 141–150. 1999. Doi:10.1016/s0168-1923(99)00080-5
- TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrig. Drain. Syst** , v. 19, p. 355–376, 2005. Doi:10.1007/s10795-005-8138-9.
- VENANCIO, L. P.; EUGENIO, F. C.; FILGUEIRAS, R.; FRANÇA DA CUNHA, F.; ARGOLO DOS SANTOS, R.; RIBEIRO, W. R.; MANTOVANI, E. C. Mapping within-field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application. **PLOS ONE**, v 15, n 7, e0235620. 2020. Doi:10.1371/journal.pone.0235620
- YUAN, X.; WOOD, E. F.; LUO, L.; PAN, M. A first look at climate forecast system version 2 (CFSv2) for hydrological seasonal prediction. **Geophys. Res. Lett.** v 38, 2011 Doi:10.1029/2011GL047792.
- ZHANG, H.; ANDERSON, R. G.; WANG, D. Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. **Field Crops Research**, v. 180, p. 143–154. 2015. Doi:10.1016/j.fcr.2015.05.023
- ZUAZO, V. H. D.; GARCÍA-TEJERO, I. F.; RODRÍGUEZ, B. C.; TARIFA, D. F.; RUIZ, B. G.; SACRISTÁN, P. C. Deficit irrigation strategies for subtropical mango farming. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41 n. 13, 02-22, 2021. Doi:10.1007/s13593-021-00671-6.
- WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. Short communication: A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 2088-2094, 2012.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO GERAL

Diante do exposto, o presente estudo atingiu seu objetivo ao destacar a relevância da evapotranspiração no ciclo hidrológico e na gestão racional da água na agricultura. Utilizando o método da razão de Bowen, estimou-se que durante os períodos das safras em 2021/2022 e 2022/2023, o pomar de mangueira *Tommy Atkins* em Cuiarana, nordeste do Pará, teve um consumo médio diário de 4,59 mm e 4,84 mm, totalizando um consumo médio de água de 721 mm ao longo do período analisado.

No entanto, ao empregar o METRIC-EEFLUX, observou-se que a evapotranspiração real do pomar tendeu a sobrestimar o método de Bowen. Embora o coeficiente de correlação de Pearson tenha revelado uma forte relação entre as estimativas dos métodos, o índice estatístico de Willmont indicou discrepâncias entre eles. A avaliação do METRIC-EEFLUX, classificado como "ruim" pelo índice Pi para estimar a ETr da mangueira em condições amazônicas, ressaltou que métodos empíricos, como o de Bowen, ainda proporcionam resultados mais satisfatórios.

Esses resultados enfatizam a complexidade da estimativa da evapotranspiração e a importância de considerar as condições específicas de cada região. Ainda há desafios a serem superados no aprimoramento do METRIC-EEFLUX para otimizar sua aplicabilidade em ambientes amazônicos. Este estudo destaca a necessidade contínua de pesquisas para aprimorar as técnicas de estimativa hídrica, contribuindo assim para a eficiente gestão dos recursos hídricos na agricultura regional.

REFERÊNCIAS

- AFZAAL, H.; FAROOQUE, A.A.; ABBAS, F.; ACHARYA, B.; ESAU, T. Precision irrigation strategies for sustainable water budgeting of potato crop in Prince Edward Island. **Sustainability**, v 12, n 2419, 2020
- SOARES, S. R. A.et al. (coord). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2ª ed. Brasília, DF: ANA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/publicacoes-1>. Acesso em: 15 de Agosto de 2024.
- ALBLEWI, B.; GHARABAGHI, B.; ALAZBA, A. A.; MAHBOUBI, A. A. Evapotranspiration models assessment under hyper-arid environment. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, p. 9905-9912, 2015.
- ALLEN, R. G. Evaporation modeling: potential. In: MALCOM G. Anderson; JEFFREY J. McDonnell (ed.). **Encyclopedia of hydrological sciences**. [S.l.: s.n], v. 41, p. 1-11, 2006.
- ALLEN, R. G.; MORTON, C.; KAMBLE, B.; KILIC, A.; HUNTINGTON, J.; THAU, D.; GORELICK, N.; ERICKSON, T.; MOORE, R.; TREZZA, R.; RATCLIFFE, I.; ROBISON, C. EEFlux: a landsat-based evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. In: ASABE/IA IRRIGATION SYMPOSIUM: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation-A Tribute to the Career of Terry Howell. **Conference Proceedings**. [S.l]: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015. p. 1-11
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrigation Science**, v. 28, p. 17-34, 2009.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 899-920, 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).
- 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**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSSEN, W. G. M. **Sebal (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and User's Manual –Idaho Implementation**, v.1, p.1-97, 2002.
- ANAPALLI, S. S.; AHUJA, L. R.; GOWDA, P. H.; MA, L.; MAREK, G.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 274-283, 2016.

ANDRADE, A. S. J.; BASTOS, E. A.; SENTELHAS, P. C.; SILVA, A.A.G. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, n.1, p.63-68, 2003.

ANDRADE, V. P. M. **Estratégias de manejo de irrigação para o cultivo da mangueira ‘Kent’ no semiárido brasileiro**. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2021, 77f.

ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; PINHEIRO, F. M. A.; MARQUES, V. S.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte2: balanço de energia e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.4, 535-542, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000400012>.

ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTI&FRUTI – ABH. **Santa Cruz do Sul**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, [s.l.] 2022. 96 p.

AYYAD, S.; AL ZAYED, I. S.; HA, V. T. T.; RIBBE, L. The performance of satellite-based actual evapotranspiration products and the assessment of irrigation efficiency in Egypt. **Water**, v. 11, n. 9, 2019. Doi:10.3390/w11091913

BARUFFI, F.; CISOTTO, A.; CIMOLINO, A.; FERRI, M.; MONEGO, M.; NORBIATO, D.; CAPPELLETTO, M.; BISAGLIA, M.; PRETNER, A.; GALLI, A.; SCARINCI, A.; MARSALA, V.; PANELLI, C.; GUALDI, S.; BUCCHIGNANI, E.; TORRESAN, S.; PASINI, S.; CRITTO, A.; MARCOMINI, A. Climate change impact assessment on Veneto and Friuli plain groundwater. Part I: an integrated modeling approach for hazard scenario construction. **Science of The Total Environment**, v. 440, 154–166. 2012. Doi:10.1016/j.scitotenv.2012.07.070

BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL - based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100, 2000.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, p. 85-93, 2005.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e Evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 95p. (IPAGRO. Boletim Técnico,7).

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by evaporation from any water surface. **Physical Review**, 27: 779-787. 1926. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.27.779>.

BRAUN, P.; MAURER, B.; MULLER, G.; GROSS, P.; HEINEMANN, G.; SIMMER, C. An integrated approach for the determination of regional evapotranspiration using mesoscale modelling, remote sensing and boundary layer measurements. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 76, p. 83-105, 2001.

CALDAS, M. M.; WALKER, R.; SHIROTA, R.; PERZ, S.; SKOLE, D. Ciclo de vida da família e desmatamento na Amazônia: combinando informações de sensoriamento remoto com dados primários. **Revista Brasileira de Economia**, v.57 n. 4. 2003. Doi:10.1590/S0034-71402003000400002.

CAMARGO, A.P. de; CAMARGO, M.B.P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v.59, p.125-137, 2000.

CHARTZOULAKIS, K.; BERTAKI, M. Sustainable water management in agriculture under climate change. **Agric Agric Sci Procedia**, v. 4, 88–98, 2015.

CHOI, M.; KUSTAS, W. P.; ANDERSON, M. C.; ALLEN, R. G., LI, F.; KJAERGAARD, J. H. An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, U.S.) during SMACEX. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 12, p. 2082–2097. 2009. Doi:10.1016/j.agrformet.2009.07.002

CONSOLI, S.; VANELA, D. Mapping crop evapotranspiration by integrating vegetation indices into a soil water balance model. **Agricultural Water Management**, v. 143, 2014, 71–81. 2014. Doi:10.1016/j.agwat.2014.06.012

COSTA, J. O.; JOSÉ, J. V.; WOLFF, W.; DE OLIVEIRA, N. P. R.; OLIVEIRA, R. C.; RIBEIRO, N. L.; COELHO, R. D.; SILVA, T. J. A.; SILVA-BONFIM, E. M.; SCHLICHTING, A. F. Spatial variability quantification of maize water consumption based on Google EEflux tool. **Agricultural Water Management**, 232, 106037. 2020. Doi:10.1016/j.agwat.2020.106037

COURAULT, D.; SEGUIN, B.; OLIOSO, A. **Review to estimate Evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use of mesoscale atmospheric models.** In: ICID Workshop on Remote Sensing of et for Large Regions, 2003. Proceedings...2003,v. 17, p. 1-18.

DARSHANA; PANDEY, A.; PANDEY, R. P. Analysing trends in reference evapotranspiration and weather variables in the Tons River Basin in Central India. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 27, p. 1407-1421, 2013.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. da; DA SILVA, V. P. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 58, n. 3, p. 241–254. 2003. doi:10.1016/s0378-3774(02)00083-5

CAVALCANTE, E. G. C. J.; MEDEIROS, J. F.; OLIVEIRA, A. K. S. de.; ESPINDOLA SOBRINHO, J.; SILVA, J. P.; SILVA, T. G. F. Necessidade hídrica da cultura do milho influenciada pelas mudanças climáticas no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 2, p. 251-262, 2018.

DIAS, T. L.; VICENTE, M. R.; SANTOS, R. M. dos; LIMA, V. O. B.; NUNES, S. M. V. Estimation of water consumption of eucalyptus using images from orbital sensors. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 7, p. e48011730362, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i7.30362. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/30362>. Acesso em: 29 aug. 2023.

DINIZ, R. R. S.; CORDÃO, M. A.; GUERRA, H. O. C.; OLIVEIRA, C. W. Evapotranspiração real da banana-nanica determinada pelo algoritmo METRIC no semiárido do Ceará, **Irriga**, v. 26, n. 3, p. 701–716, 2021. Doi: 10.15809/irriga.2021v26n3p701-716.

DIRO, G.T.; SUSHAMA, L.; MARTYNOV, A.; JEONG, D.I.; VERSEGHY, D.; WINGER, K. Land atmosphere coupling over North America in CRCM5. **J. Geophys. Res. Atmos.** 119, 1955–1972, 2014.

DIMITRIADOU, S.; NIKOLAKOPOULOS, K. G. Evapotranspiration Trends and Interactions in Light of the Anthropogenic Footprint and the Climate Crisis: A Review. **Hydrology**, 08, 163.2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/hydrology8040163>

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144p.(FAO Irrigation and Drainage Paper 24).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa dos Solos. **Manual de método e análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p

ESCARABAJAL-HENAREJOS, D.; MOLINA-MARTÍNEZ, J.M.; FERNÁNDEZ-EUSER, T.; LUXEMBURG, W. M. J.; EVERSON, C. S.; MENGISTU, M. G.; CLULOW, A. D.; BASTIAANSSEN, W. G. M. A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb temperature profiles. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 2021-2032, 2014

ESTEVES, B. dos S.; SOUSA, E. F. D.; MENDONÇA, J. C.; LOUSADA, L. de L.; MARCIANO, C. R.; SIQUEIRA, D. P. Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar utilizando a razão de Bowen. **IRRIGA**, v. 19, n. 3, p. 441–452, 2014. Doi: 10.15809/irriga.2014v19n3p441.

EUSER, T.; LUXEMBURG, W. M. J.; EVERSON, C. S.; MENGISTU, M. G.; CLULOW, A. D.; BASTIAANSSEN, W. G. M. A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb temperature profiles. **Hydrol Earth Syst Sci**, v. 18 2021-2032, 2014. Doi: <https://doi.org/10.5194/hess-18-24-2021-2014>

FILGUEIRAS, R.; CHARTUNI MANTOVANI, E.; ALTHOFF, D.; BALIEIRO RIBEIRO, R.; PERONI VENANCIO, L.; ARGOLO DOS SANTOS, R. Dynamics of actual crop evapotranspiration based in the comparative analysis of sebal and metric-eefflux. **Irriga**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 72–80, 2019. DOI: 10.15809/irriga.2019v1n1p72-80. Disponível em: <https://energia.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3892>. Acesso em: 26 jul. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAOSTAT. Worldwide Fruit Production. 2019. Disponível em <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> Acesso 8 de março de 2023.

FOOLAD, F.; BLANKENAU, P.; KILIC, A.; ALLEN, R. G.; HUNTINGTON, J. L.; ERICKSON, T. A.; OZTURK, D.; MORTON, C. G.; ORTEGA, S.; RATCLIFFE, I.; FRANZ, T. E.; THAU, D.; MOORE, R.; GORELICK, N.; KAMBLE, B.; REVELLE, P.; TREZZA, R.; WENGUANG ZHAO, W.; A ROBISON, C. W. Comparison of the automatically calibrated google evapotranspiration application-EEFlux and the manually calibrated METRIC application. **Preprints**. 2018. Doi: <https://doi.org/10.20944/preprints201807.0040.v1>

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 256 p.

FRENCH, A. N.; HUNSAKER, D. J.; THORP, K. R. Remote sensing evapotranspiration over cotton using TSEB and METRIC energy balance model. **Remote Sensing of Environment**, v. 158, p. 282-294, 2015.

GARCIA, B. N. R.; VIEIRA, T.A.; OLIVEIRA, F. de A. Quintais agroflorestais e segurança alimentar em uma comunidade rural na Amazônia Oriental. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 114, 2015.

HAFEEZ, M. M.; CHEMIM, Y.; VAN DE GIESEN, N.; BOUMAN, B.A. M. **Field Evapotranspiration in Central Luzon, Philippines, using Different Sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster**. In: Symposium on Geospatial theory, Processing and Applications, Ottawa, Canadá. Anais... 2002.

HÄUSLER, M.; NUNES, J.P.; SILVA, J.M.N.; KEIZER, J.J.; WARNEKE, T.; PEREIRA, J.M.C. A promising new approach to estimate Drought indices for fire danger assessment using remotely sensed data. **Agric. For. Meteorol.** 274, 195–209, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção agrícola municipal**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisa>. Acessado em: 15 de out de 2022.

IRMAK, S.; SKAGGS, K. E.; CHATTERJEE, S. A Review of the Bowen ratio surface energy balance method for quantifying evapotranspiration and other energy fluxes. **Transactions of The Asabe**, [s.l.], v. 57, n. 6, p.1657-1674, 2014.

KANG, S.; ZHANG, B.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural Journal**, v.148, p.1629-1640, 2008.

KHAN, A.; STÖCKLE, C. O.; NELSON, R. L.; PETERS, T.; ADAM, J. C.; LAMB, B.; CHI, J.; WALDO, S. Estimating biomass and yield using metric evapotranspiration and simple growth algorithms. **Agronomy Journal**. v. 111, n. 2, 536–544, 2019. Doi: <https://doi.org/doi:10.2134/agronj2018.04.0248>

LEMOES, L. C. A. F. ; CARVALHO, L. G.; EVANGELISTA, A. W. P.; JÚNIOR, J. A. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1294-1303, 2010.

LEWIS, C. S.; ALLEN, N. L. Potential crop evapotranspiration and surface evaporation estimates via a gridded weather forcing dataset. **Journal of Hydrology**, v. 546, p. 450-463, 2017.

LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. de A.; SILVA, I. de F. da. Estimativa da evapotranspiração do feijão caupi utilizando o modelo de Penman-Monteith. **Irriga**, v. 11, n. 4, p. 477–491, 2006. Doi: 10.15809/irriga.2006v11n4p477-491. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3271>. Acesso em: 29 ago. 2023.

LIMA, E. M. de; FURTADO, A. C. S.; RODRIGUES, S.; DE SOUZA, F. I. B. **Estudo de caso de caráter sociocientífico sobre a utilização de Mangifera indica L. na medicina popular**. In Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: seminário de iniciação científica da Embrapa Amazônia Oriental, 23., 2019, Belém, PA. Anais. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2019.

LIPAN, L.; CARBONELL-PEDRO, A. A.; CÁRCELES RODRÍGUEZ, B.; DURÁN-ZUAZO, V.H.; FRANCO TARIFA, D.; GARCÍA-TEJERO, I.F.; GÁLVEZ RUIZ, B.; CUADROS TAVIRA, S.; MUELAS, R.; SENDRA, E.; et al. Can sustained deficit irrigation save water and meet the quality characteristics of mango? **Agriculture**, v.11 n. 448. 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture11050448>

LIU, S. M.; XU, Z. W.; ZHU, Z. L.; JIA, Z. Z.; ZHU, M. J. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 487, p. 24-38, 2013

LIU, Z.; BALLANTYNE, A.P.; COOPER, L.A. Biophysical feedback of global forest fires on surface temperature. **Nat. Commun.** v. 10, 1–9. 2019.

LU, Y.; JIN, J.; KUEPPERS, L.M. Crop growth and irrigation interact to influence surface fluxes in a regional climate-cropland model (WRF3.3-CLM4crop). **Clim. Dyn.** 45, 3347–3363, 2015.

LUCAS, A. T. T. **Impactos da irrigação na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins**. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP. 2007. 102 f.

MAJIDI, M.; ALIZADEH, A.; VAZIFEDOUST, M.; FARID, A.; AHMADI, T. Analysis of the effect of missing weather data on estimating daily reference evapotranspiration under different climatic conditions. **Water Resources Management**, v. 29, p. 2107-2124, 2015

MALHI, Y.; PEGORARO, E.; NOBRE, A. D.; PEREIRA, M. G. P.; GRACE, J.; CULF, A. D.; CLEMENT, R. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **J. Geophys. Res.** v. 107, p. 45-1 - 45-17, 2002.

MAURANO, L. E. P.; ESCADA, M. I. S.; RENNO, C. D. Padrões espaciais de desmatamento e a estimativa da exatidão dos mapas do PRODES para Amazônia Legal Brasileira. **Ciência Florestal**, v.29 n.4, 2019.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. M. **Reflectância dos materiais terrestres**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

MUELLER, N. D.; RHINES, A.; BUTLER, E.E.; RAY, D.K.; SIEBERT, S.; HOLBROOK, N. M.; HUYBERS, P. Global relationships between cropland intensification and summer temperature extremes over the last 50 years. **J. Clim.** v. 30, 7505–7528. 2017.

OLIVEIRA, F. S. C.; JANDREICE, M. P. H.; LILLA M. R. Orbital remote sensing for evapotranspiration modeling: theoretical overview and applications in cloud computing. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15 n. 3, 425–468. 2021. Doi: <https://doi.org/10.18011/bioeng2021v15n3p425-468>

OLIVEIRA, L. P. M.; SILVA, F. D. S.; COSTA, R. L. JÚNIOR, R. L. R.; GOMES, H. F. B.; PEREIRA, M. P. T.; MONTEIRA, L.; SILVA, V. Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cana de açúcar em Maceió. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 969-980, 2021.

PAULA, A. C. P. DE; SILVA, C. L. DA; RODRIGUES, L. N.; SCHERER-WARREN, M. Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 54, e00739. 2019. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00739>

PEREIRA, A. B.; VILLA NOVA, N. A.; PIRES, L. F.; ANGELOCCI, L. R.; BERUSKI, G. C. Estimation method of grass net radiation on the determination of potential evapotranspiration. *Meteorological Applications*, v. 21, p. 369-375, 2014.

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

PIERDONÁ, H. L.; PAULA, A. C. P. DE.; SILVA, C. L. DA S.; WARREN, M. S.; RODRIGUES, L. N. Comparação entre dois modelos usados na estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n.5, p.431-439, 2019. Doi: [10.13083/reveng.v27i5.877](https://doi.org/10.13083/reveng.v27i5.877)

PINTO, J. M.; COELHO, E. F.; SIMOES, W. L. **Irrigação**. In: BORGES, A. L.; CORDEIRO, Z. J. M. (Ed.). Sistema orgânico de produção de manga para a Região da Chapada Diamantina, Bahia. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2021.

PRAKASH, K.; VIJAYAKUMAR, R. M.; BALAMOHAN, T. N.; SUNDHAR SINGH, S. D. Effect of drip irrigation regimes and fertigation levels on yield and quality of mango cultivar 'alphonso' under ultra high density planting. **Acta Horticulturae**, v. 1066, p. 147-150, 2015.

REYES-GONZÁLEZ, A.; KJAERGAARD, J.; TROOIJEN, T.; HAY, C.; AHIABLAME, L. Estimation of crop evapotranspiration using satellite remote sensing-based vegetation index. **Hindawi Advances in Meteorology**, v. 18, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1155/2018/4525021>

RODRIGUES, J. C.; SOUZA, PAULO J. O. P. de; LIMA, R. T. de. Estimativa de temperaturas basais e exigência térmica em mangueiras no nordeste do estado do Pará. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.35 n.1, 143–150, 2013. Doi:10.1590/s0100-29452013000100017.

ROJAS, J. P.; SHEFFIELD, R. E. Evaluation of daily reference evapotranspiration methods as compared with the ASCE-EWRI Penman-Monteith equation using limited weather data in Northeast Louisiana. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 4, p. 285-292, 2013Parte superior do formulário

RUDNICK, D.R.; IRMAK, S. Impact of nitrogen fertilizer on maize evapotranspiration crop coefficients under fully irrigated, limited irrigation, and rainfed settings. **J. Irrig. Drain. Eng.** v. 140, 4014039, 2014.

SANTOS, M. A.; BASTOS LYRA, G.; DE SOUZA, J. L.; ARAÚJO FERREIRA JÚNIOR, R. Incertezas na estimativa da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen em cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo-AL. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, 108. 2020. Recuperado de <https://editoraime.com.br/revistas/index.php/rema/article/view/188>

SANTOS, T. V. **Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na Bacia do Jacuí por meio de imagens orbitais.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 96f.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 635-644, 2010.

SHIMABUKURO, Y. E. HOLBEN, B. N.; TUCKER, C. J. Fraction images derived from NOAA AVHRR data for studying the deforestation in the brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**. v. 15, n.3, p. 517-520, 1994.

SILVA, C. O. F.; MAGNONI, P. H. J.; MANZIONE, R. L. Sensoriamento remoto orbital para modelagem da evapotranspiração: síntese teórica e aplicações em computação na nuvem. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 425-468, 8 nov. 2021. Doi: <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2021v15n3p425-468>.

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**, v.78, n.15, 2019.

SILVA, T. G. F. da; MOURA, M. S. B. de; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. de S.; GOMES JÚNIOR, W. F. Demanda hídrica e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 12, 1257–1265. 2011. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011001200007>

SILVA, T. G. F. da; MOURA, M. S. B. de; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. de S.; GOMES JÚNIOR, W. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar

irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, 64–71. 2012. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100009>

SILVA, T. T. S. **Estimativa de evapotranspiração em regiões do semiárido brasileiro utilizando o algoritmo SEBAL**. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2019.

SILVA, T. T. S. GUERRA, H. O. C., SILVA, B.B., SANTOS, C. L. M., GUIMARÃES, J.P.; SANTOS J. Evapotranspiration of banana tree using the SEBAL algorithm in an irrigated perimeter from the Northeastern Brazil. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, Campina Grande, PB. v.25, n.3, p.149-155, 2021.

SILVA, V. DE P. R. da.; GARCÊZ, S. L. A.; SILVA, B. B. DA; ALBUQUERQUE, M. F. de; ALMEIDA, R. S. R. Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n. 5, 411–417. 2015. Doi: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p411-417>

SINGH, R. K.; LIU, S.; TIESZEN, L. L.; SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; Estimating seasonal evapotranspiration from temporal satellite images. **Irrigation Science**, v. 30 p. 303-313. 2012.

SOARES, M. C. R.; WEBLER, A. D. Estudo da razão de Bowen em uma área de floresta no sudoeste da Amazônia. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 504-509, 2016.

SOUSA, A. M. L. de; VITORINO, M. I., CASTRO, N. M. dos R., BOTELHO, M. do N.; SOUZA, P. J. O. P. de. Evapotranspiration from remote sensing to improve the SWAT model in Eastern Amazonia. **Floresta & Ambiente**, v. 22 n.4, 456–464. 2015. Doi: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.083814>

SOUSA, D. de P.; FERNANDES, T. F. S.; TAVARES, L. B.; FARIAS, V. D. da S.; LIMA, M. J. A. de; NUNES, H. G. G. C.; DEBORAH LUCIANY PIRES COSTA, D. L. P.; ORTEGA-FARIAS, S.; SOUZA, P. J. de O. P. Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. **Irrigation Science**, v. 39, n. 1, p. 5–22. 2021. Doi:10.1007/s00271-020-00710-2

SOUZA, P. J. D. O. P. D.; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L. D.; LIMA, R. T. D.; ROCHA, E. J. P. D.; ORTEGA-FARIAS, S. Water requirement estimate for the reproductive period of mango orchards in the Northeast of the state of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, n. 3, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1590/0100-29452016311>

SOUZA, P. J. de O. P. de; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L. de; SOUZA, E. B. De. Diurnal energy balance in a mango orchard in the Northeast of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 537–546. 2018.doi:10.1590/0102-7786333012

SOUZA, P. J. D. O. P. D.; SILVA, E. R. R.; SILVA, B. B. D.; FERREIRA, T. R.; SOUSA, D. D. P.; LUZ, D. B. D.; ADAMI, M.; SOUSA, A. M. L. D.; NUNES, H. G. G. C.; FERNANDES, G. S. T.; PINTO, J. V. N.; FARIAS, V. D. da S.; OLIVEIRA, I. A. de; SILVA, S. A.S. da.; COSTA, J. F.; RUA, M. L.; COSTA, D. L. P.; MOURA, V. B.; LIMA,

M. J. A. de; SANTOS, J. E. O.; SOUSA, A. J. S.; ORTEGA-FARIAS, S. Estimation of the Evapotranspiration of Irrigated Açaí (*Euterpe oleracea* M.), through the Surface Energy Balance Algorithm for Land—SEBAL, in Eastern Amazonia. **Water**, v. 15, n. 6, p.1073, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/w15061073>

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R. A. J.; ROCHA, F. A.; SANTOS, L. C.; SILVA, C. S. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. **Revista Caatinga, Mossoró**, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

TANNY, J. Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review. **Biosystems Engineering**, v. 114, p. 26-43, 2013.

TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrig. Drain. Syst**, v. 19, p. 355–376, 2005. Doi:10.1007/s10795-005-8138-9.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASSOI, L. H. B.; REIS, V. C. S.; SILVA, T. G. F.; FERREIRA, M. N. L.; MAIA, J. L. T. Estimativa do consumo hídrico da goiabeira, utilizando estações meteorológicas: automáticas e convencional. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.457-460, 2003. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452003000300024>.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W. G. M. Five methods to interpret field measurements of energy fluxes over a micro-splinker irrigated mango orchard. **Irrigation Science**, v.30, p.13-28, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0256-y>

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASSOI, L. H.; COSTA, W. P. L. B. da; SILVA, J. A. M. e; SILVA, E. E. G. da. Consumo hídrico da bananeira no Vale do São Francisco estimado pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 45-50, 2002.

VENANCIO, L. P.; EUGENIO, F. C.; FILGUEIRAS, R.; FRANÇA DA CUNHA, F.; ARGOLO DOS SANTOS, R.; RIBEIRO, W. R.; MANTOVANI, E. C. Mapping within-field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application. **PLOS ONE**, v. 15, n. 7, e0235620. 2020. Doi:10.1371/journal.pone.0235620

VICENTE-SERRANO, S. M.; AZORIN-MOLINA, C.; SANCHEZ-LORENZO, A.; REVUELTO, J.; MORÁN-TEJEDA, E.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; ESPEJO, F. Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961-2011). **Water Resources Research**, v. 50, p. 1-23, 2014.

VILLA NOVA, N.A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz**. ESALQ-USP, Piracicaba, Tese de Livre-Docência, 1973. 89 p.

WU, J.; LAKSHMI, V.; WANG, D.; LIN, P.; PAN, M.; CAI, X.; WOOD, E. F.; ZENG, Z. The reliability of global remote sensing evapotranspiration products over amazon. **Remote Sensing**. V.12 n.14, 2020. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs12142211>.

WALL-MEDRANO, A. et al. El mango: aspectos agroindustriales, valor nutricional/funcional y efectos en la salud. **Nutricion hospitalaria**, v. 31, n. 1, p. 67-75, 2015.

ZHANG, H.; ANDERSON, R. G.; WANG, D. Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. **Field Crops Research**, v. 180, p. 143–154. 2015. Doi:10.1016/j.fcr.2015.05.023

ZUAZO, V. H. D.; GARCÍA-TEJERO, I. F.; RODRÍGUEZ, B. C.; TARIFA, D. F.; RUIZ, B. G.; SACRISTÁN, P. C. Deficit irrigation strategies for subtropical mango farming. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41 n. 13, 02-22, 2021. Doi:10.1007/s13593-021-00671-6.