



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

**LEIDIANE RIBEIRO MEDEIROS**

**USO DO ALGORITMO SEBAL NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
EM UM POMAR DE MANGAS NO NORDESTE PARAENSE: Uma abordagem  
socioambiental**

**BELÉM – PA  
2022**

**LEIDIANE RIBEIRO MEDEIROS**

**USO DO ALGORITMO SEBAL NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
EM UM POMAR DE MANGAS NO NORDESTE PARAENSE: uma abordagem  
socioambiental**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Embrapa Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais.

Orientador: Adriano Marlison Leão de Sousa

**BELÉM – PA  
2022**

**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)**

---

M488u Medeiros, Leidiane Ribeiro.  
    Uso do algoritmo Sebal na estimativa da evapotranspiração em  
    um pomar de mangas no Nordeste paraense : uma abordagem  
    socioambiental / Leidiane Ribeiro Medeiros. — 2022.  
    89 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, 2022.

    1. Mangifera indica. 2. fluxo de energia. 3. água. 4.  
    sensoriamento remoto. I. Título.

CDD 630.2515098115

---

**LEIDIANE RIBEIRO MEDEIROS**

**USO DO ALGORITMO SEBAL NA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UM POMAR DE MANGAS NO NORDESTE  
PARAENSE: uma abordagem socioambiental**

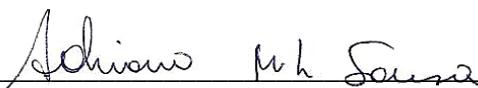
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Embrapa Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

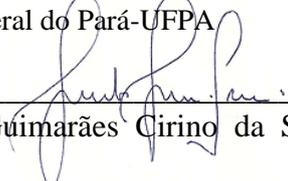
Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

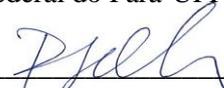
Linha de pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais.

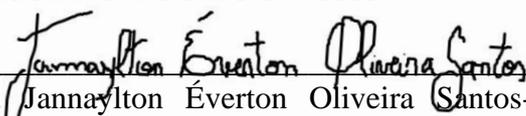
**Data de Defesa:** 28 / 06 / 2022

**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Adriano Marlison Leão de Sousa- Orientador  
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental  
Universidade Federal do Pará-UFPA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Glauber Guimarães Cirino da Silva – Membro interno  
Doutor em Clima e Ambiente  
Universidade Federal do Pará-UFPA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Paulo Jorge de Oliveira Pontes de Souza–Membro interno  
Doutor em Meteorologia  
Universidade Federal do Pará-UFPA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Jannaylton Éverton Oliveira Santos- Membro externo  
Doutor em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA

**Gratidão a Deus, a minha mãe,  
irmãs, ao meu pai [*in memorium*] e  
a todos que acreditam nos meus objetivos.**

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço à Deus, por ter permitido a minha chegada até aqui, com saúde e perseverança, por ter me protegido de todo mal ao longo da minha caminhada e nunca ter deixado eu desistir dos meus ideais.

Agradeço aos meus pais Dulcineia Medeiros e Paulo Sergio (*In memoriam*), que são minha fonte de inspiração, amor, fortaleza e meu refúgio. São meus grandes motivos para continuar persistindo nos meus ideais. Neles, vejo força, garra e luz, que me fazem ter coragem em ultrapassar os obstáculos do dia a dia.

Agradeço as minhas irmãs Lilian e Ana Paula, por toda a confiança dada e por simplesmente nunca terem me deixado desistir dos meus sonhos.

*In memoriam*, a minha avó Maria Laura, que não abriu só a porta de sua casa para me acolher por muitos anos, mas também do seu coração. Com uma sabedoria incrível soube me aconselhar sem muitas vezes precisar falar nada, foi um ser humano com muita sabedoria que sempre viverá em meu coração.

Aos meus tios, (em especial Gercileia Medeiros e Marco Aurélio), que sempre me incentivaram aos estudos e acreditaram nos meus sonhos. Aos meus amigos, por sempre me incentivarem a dias melhores, são por essas atitudes e muitas experiências compartilhadas que agradeço as abençoadas amizades que Deus me proporcionou ter.

Ao meu orientador Adriano Sousa, pela atenção e ensinamentos, sendo sempre muito profissional, ético e compreensível durante toda minha jornada no PPGCA. Gratidão por ter confiado na minha capacidade e competência. Meus sinceros agradecimentos também a todos professores da banca por toda contribuição para melhoria do meu trabalho.

Agradeço ao Programa LBA (Programa de Grande Escala Biosfera-Atmosfera na Amazônia-INPA), pelo uso e disponibilização dos dados, suporte logístico e infraestrutura durante as atividades de campo.

Agradeço a coordenação do curso, em especial a professora Julia Clarinda Paiva Cohen por todo apoio necessário para a conclusão desta etapa tão importante para mim.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo que financiou os meus estudos.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta, na construção dessa pesquisa.

**GRATIDÃO**

## RESUMO

As mudanças no uso e cobertura do solo como a conversão de florestas em pastagens ou expansão urbana alteram as componentes do balanço de radiação, bem como o fluxo de calor e da evapotranspiração. A evapotranspiração é um dos componentes mais importantes do ciclo hidrológico e do equilíbrio climático, principalmente em área urbana. A estimativa dessa variável é fundamental para o manejo dos recursos hídricos de uma região, bem como da produtividade de uma cultura, principalmente aquelas que enfrentam escassez hídrica. Neste sentido este trabalho teve como objetivo estimar a evapotranspiração real diária (ET<sub>r</sub>) do pomar de manga e suas áreas subjacentes para os anos de 2015, 2017 e 2020 no vilarejo de Cuiarana, no município de Salinópolis do Nordeste Paraense. A metodologia utilizada envolveu o uso do algoritmo Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) para estimativa de ET<sub>r</sub>, com imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS, para o período de 02/08/2015, 06/07/2017 e 02/08/2021, assim como dados meteorológicos obtidos de uma torre meteorológica localizada no Sítio Experimental de Cuiarana. Por meio deste algoritmo foram gerados os mapas dos parâmetros estatísticos, calculados para as diferentes coberturas de uso da terra. Os resultados obtidos de ET<sub>r</sub> foram comparados como os valores obtidos pelo método da FAO-Penman-Monteith e da Razão de Bowen, por meio de seus erros estatísticos. As maiores médias de valores de ET<sub>r</sub> foram obtidas para a imagem 02/08/2015, com média de 4,805 mm/dia, sendo a área do pomar de manga uma das principais contribuintes para esse resultado, assim como a área do manguezal. Ao ser comparado com outros métodos de referência, os valores estimados pelo SEBAL foram coerentes com a literatura, sendo a sua variação temporal afetada fortemente pelo fenômeno do El Niño. Assim, o algoritmo SEBAL tem potencial para ser assimilado no processo de gestão dos recursos hídricos da região, bem como no manejo da cultura.

**Palavras-chave:** *Mangifera indica*; fluxo de energia; água; sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

Changes in land use and land cover such as conversion of forests to pastures or urban expansion alter the components of the radiation balance, as well as the flow of heat and evapotranspiration. Evapotranspiration is one of the most important components of the hydrological cycle and climate balance, especially in urban areas. The estimation of this variable is essential for the management of water resources in a region, as well as the productivity of a crop, especially those that face water scarcity. In this sense, this work aimed to estimate the real daily evapotranspiration (ET<sub>r</sub>) of the mango orchard and its underlying areas for the years 2015, 2017 and 2020 in the village of Cuiarana, in the municipality of Salinópolis do Nordeste Paraense. Using this algorithm, maps of statistical parameters were generated, calculated for the different land use covers. The results obtained from ET<sub>r</sub> were compared with the values obtained by the FAO-Penman-Monteith method and the Bowen Ratio, through their statistical errors. The highest mean values of ET<sub>r</sub> were obtained for the image 08/02/2015, with an average of 4.805 mm/day, with the mango orchard area being one of the main contributors to this result, as well as the mangrove area. When compared with other reference methods, the values estimated by SEBAL were consistent with the literature, with its temporal variation being strongly affected by the El Niño phenomenon. Thus, the SEBAL algorithm has the potential to be assimilated in the process of managing water resources in the region, as well as in crop management.

**Keywords:** *Mangifera indica*; energy fluxes; water; remote sensing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Mapa da distribuição espacial da Precipitação para o período de agosto/2015 (A), julho/2017 (B) e agosto/2021 (C). .....	21
Figura 2- Mapa da distribuição espacial da Temperatura para o período de agosto/2015 (A), julho/2017 (B) e agosto/2021 (C). .....	22
Figura 3- Comportamento espectral da vegetação .....	31
Figura 4 - Especificações das bandas espectrais dos sensores OLI e TIRS do Landsat 8....	32
Figura 5-Pomar de mangueiras cultivadas no sítio experimental Modesto Rodrigues, Cuiarana. Salinópolis, PA. ....	33
Figura 6- Localização da área de estudo no sítio experimental Modesto Rodrigues, Cuiarana. Salinópolis, PA. ....	34
Figura 7- Recorte espacial da área analisada nesta pesquisa. Vila de Cuiarana, Salinópolis-PA. ....	35
Figura 8- Torre micrometeorológica localizada no Sítio experimental de Cuiarana, Salinópolis-PA.....	37
Figura 9- Sensores da torre micrometeorológica da área experimental de Cuiarana- PA: (A) Anemômetro; (B) Termo-Higrômetro, (C) Radiômetro e (D) Piranômetro. ....	38
Figura 10- Fluxograma metodológico para o cálculo do saldo de radiação instantâneo.....	41
Figura 11- Etapas para o processamento da estimativa do fluxo de calor sensível (H). ....	49
Figura 12- Variação mensal da precipitação acumulada e temperatura média para o ano de 2021, no Sítio Experimental de Cuiarana. Salinópolis-PA.....	55
Figura 13- Distribuição espacial do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA. ....	57
Figura 14- Distribuição espacial da Temperatura de superfície ( $T_s$ °C) nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA. ....	59

Figura 15- Distribuição espacial do Calor Sensível (A) e Calor Latente (B) nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA. ....	62
Figura 16- Distribuição espacial do albedo de superfície nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA. ....	65
Figura 17- Distribuição espacial do Saldo de Radiação de superfície nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA. ....	67
Figura 18- Distribuição espacial da Evapotranspiração diária (mm) nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA. ....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros utilizados na calibração e no cômputo do balanço de energia, balanço de radiação e suas componentes, obtidas das imagens Landsat 8 e da estação meteorológica automática. Cuiarana, Salinópolis-PA. ....	36
Tabela 2- Instrumentos utilizados no monitoramento micrometeorológico em um pomar de manga, cv. Tommy Atkins, Salinópolis, Pará, Brasil. ....	38
Tabela 3 - Coeficientes de calibração do OLI - Landsat 8 ab e bb, irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera – kb empregados na conversão da refletância monocromática em albedo e algumas características das bandas espectrais. ....	42
Tabela 4- Parâmetros biofísicos estimados pelo algoritmo SEBAL para a área de estudo, Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA. ....	54
Tabela 5-Comparação entre a evapotranspiração obtida pelo algoritmo SEBAL e a obtida pelo modelo de Penman- Monteith, com seus respectivos erros relativo (ER), absoluto (EA) e a raiz do erro quadrático (REQ). ....	70
Tabela 6- Comparação entre a evapotranspiração obtida pelo algoritmo SEBAL e a obtida pelo Método da Razão de Bowen, com seus respectivos erros relativo (ER), absoluto (EA) e a raiz do erro quadrático (REQ). ....	70

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	15
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
<b>3.1</b>	<b>Cultura da manga (<i>Mangifera indica</i> L.)</b> .....	16
3.1.1	Aspectos socioambientais da cultura da manga.....	19
<b>3.2</b>	<b>Evapotranspiração da cobertura vegetal</b> .....	20
<b>3.3</b>	<b>Método de Penman Monteith FAO 56</b> .....	22
<b>3.4</b>	<b>Balanco de energia pela Razão de Bowen</b> .....	23
<b>3.5</b>	<b>SEBAL e Componentes do Balanco de energia</b> .....	25
<b>3.6</b>	<b>Serviços ecossistêmicos e uso e cobertura do solo</b> .....	27
<b>3.7</b>	<b>Sensoriamento remoto</b> .....	29
3.7.1	Landsat 8 TIRS/OLI .....	31
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	33
<b>4.1</b>	<b>Área de estudo</b> .....	33
<b>4.2</b>	<b>Dados meteorológicos</b> .....	36
<b>4.3</b>	<b>Dados e imagens do Landsat 8</b> .....	39
<b>4.4</b>	<b>Evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith FAO-56</b> .....	51
<b>4.5</b>	<b>Evapotranspiração pela Razão de Bowen</b> .....	52
<b>4.6</b>	<b>Análise estatística</b> .....	53
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	54
<b>5.1</b>	<b>Variação dos parâmetros biofísicos e das variáveis climatológica</b> .....	54
<b>5.2</b>	<b>Distribuição espaço temporal dos parâmetros biofísicos</b> .....	56
<b>5.3</b>	<b>Comparação e validação da evapotranspiração real diária obtida pelo algoritmo SEBAL com métodos empíricos</b> .....	70
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	72
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	73

<b>APÊNDICE A- Quadro 1- Dados para obtenção da evapotranspiração diária de Penman-Monteith na área de estudo. Sítio experimental de Cuiarana, Salinópolis-PA. ....</b>	<b>88</b>
---	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento nas emissões de gases do efeito estufa na atmosfera associado a má gestão dos recursos hídricos tem agravado a situação de seca e escassez hídrica em muitas regiões do planeta, o que representa um grande desafio aos governos e população em prol da segurança hídrica (WOLFF, 2021; CANTELLE; LIMA, BORGES, 2018).

A Evapotranspiração das florestas, em especial as da região Amazônia são essenciais para o fornecimento de umidade em outras regiões, como da América do Sul, contribuindo na formação de massas de ar carregadas de vapor de água, conhecidas como “rios voadores” (ROCHA et al., 2017). Segundo Lins et al. (2021), a evapotranspiração é um dos fatores mais importantes no ciclo hidrológico, principalmente em regiões com temperaturas elevadas e alta demanda hídrica pelas culturas, além de ser fundamental nas equações de energia na superfície da Terra (SILVA; MAGNONI; MANZIONE, 2021).

O conhecimento da demanda da evapotranspiração regional é fundamental para um planejamento eficaz da irrigação e o uso ideal dos recursos hídricos, principalmente em locais onde a produção agrícola irrigada representa uma grande porcentagem da economia regional (AYRIMORAES; PERDIGÃO; TRÖGER, 2022). Essa variável pode ser obtida por métodos diretos por meio de equipamentos como os lisímetros e de forma indireta por meio de aplicação de equação baseada no balanço hídrico no solo ou de dados meteorológicos (OLIVEIRA et al., 2008).

Dentre os métodos indiretos, o de FAO Penman-Monteith, descrito por Allen et al. (1998) tem sido um dos mais aplicados na obtenção da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) por representar de maneira consistente, o fenômeno biofísico dessa variável, contudo a sua determinação depende de muitos elementos meteorológicos observados em estações meteorológicas como radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar, os quais, na maioria das vezes, são de difícil aquisição, além da onerosidade dos sensores (VICENTE et al., 2018). Outro método bastante utilizado para a estimativa da ET<sub>o</sub> é o balanço de energia obtido pela razão de Bowen, o qual estima a evapotranspiração por meio basicamente da partição de saldo de radiação nos fluxos de calor latente e nos fluxos de calor sensível do ar e do solo (PEREIRA et al., 2021). Segundo Silva et al. (2016), esse método é limitado quanto a aplicação próxima do nascer e pôr do sol, devido aos pequenos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água e do ar, além de restrições quanto a

culturas com coberturas não uniforme e outras condições adversas (advecção).

A maioria desses métodos representam os valores de maneira pontual, além da onerosidade de alguns equipamentos e logística do processo, por outro lado, os avanços nas técnicas de sensoriamento remoto tem permitido a aplicação de métodos alternativos e confiáveis para estimativas de evapotranspiração em escalas regionais (SILVEIRA et al., 2020). Muitas pesquisas têm utilizado o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) para estimar a evapotranspiração em escala regional, pois ele necessita apenas de poucos dados de superfície e de imagens de satélites que possibilitem a determinação do albedo, índices de vegetação e temperatura da superfície, como os satélites Landsat 8 - OLI/TIRS, MODIS – Terra, e poucos dados de superfície (LEE et al., 2016).

Estudos comprovam que esse modelo tem apresentado resultados satisfatórios quanto a precisão da estimativa da evapotranspiração, sendo registradas precisões de 85% em escala agrícola e mais de 95% de precisão registradas em escala regional (MARTINS; ROSA, 2019; BASTIAANSEN et al., 2005). Ao aplicar esse método em escala local e regional foi observado por Moreira et al. (2010) que em áreas irrigadas ou com vegetação nativa densa, a evapotranspiração horária foi maior quando comparada com áreas com vegetação esparsa e quase nulo em áreas degradadas.

No Estado do Pará pode-se destacar o estudo de Silva (2020) que estimou a evapotranspiração real diária do açaí (*Euterpe oleracea*) irrigado por meio da implementação do algoritmo SEBAL, no leste da Amazônia, encontrando resultados satisfatórios ao comparar com o método da razão de Bowen. Para a localidade de Cuiarana em Salinópolis do Nordeste Paraense, nenhum estudo foi encontrado referente a aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração, em particular para a área de pomar de mangueiras (*Mangifera indica* L.). Dessa maneira, considerando que a evapotranspiração varia no tempo e no espaço, a obtenção dessas informações são fundamentais para o planejamento e manejo de recursos hídricos, principalmente em locais onde a produção agrícola irrigada contribui para a economia regional (RASHID et al., 2019; LEVIZZANI; CATTANI, 2019). O conhecimento do balanço de energia e evapotranspiração em área urbana é de suma importância para o entendimento do clima local, podendo prover informações decisivas ao planejamento urbano.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Estimar a evapotranspiração real diária de um pomar de manga e áreas adjacentes com o auxílio do algoritmo SEBAL e cenas Landsat 8 TIRS/OLI para os anos de 2015, 2017 e 2021, na Vila de Cuiarana, município de Salinópolis no Nordeste Paraense.

### **2.2 Específicos**

- a) Estimar a evapotranspiração real diária e os parâmetros biofísicos para a área de estudo utilizando o algoritmo SEBAL para os anos de 2015, 2017 e 2021;
- b) Avaliar a variabilidade espacial dos parâmetros biofísicos na área de estudo (pomar de manga e suas adjacências);
- c) Comparar as estimativas de evapotranspiração obtidas pelo SEBAL com as estimadas pelo Método de Penman Monteith e Razão de Bower, analisando os erros associados as estimativas;
- d) Verificar a influência da cobertura do solo no balanço de energia e nas condições microclimáticas da Vila de Cuiarana, município de Salinópolis no Nordeste Paraense.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Cultura da manga (*Mangifera indica* L.)

A espécie *Mangifera indica* L. é uma árvore frutífera da família botânica Anacardiácea, de origem indiana e introduzida no Brasil pelos portugueses (CAMARGO; ALVES; MAZZEI, 2004). Estima-se que há mais de um milhão de variedades de manga pelo mundo, sendo cultivada em regiões tropicais e subtropicais (LEDESMA; CAMPBELL, 2019). No Brasil, a cultura de manga foi cultivada inicialmente na região sudeste, especificamente na cidade de São Paulo, se expandindo por toda região brasileira. Para essa cultura, a região do nordeste é a mais expressiva em quantidades de áreas plantadas e quantidade produzidas (toneladas), seguida pela região sudeste, sul, centro-oeste e norte (IBGE, 2020). De acordo com a pesquisa agrícola municipal realizada em 2018 pelo IBGE, o estado de Pernambuco, da Bahia e São Paulo são os que mais produzem a cultura. Das 27 unidades federativas brasileiras existentes, 21 são produtoras da cultura, o Pará encontra-se na 20ª posição de produção.

A espécie *M. indica* L. pode ser propagada via semente ou de forma vegetativa (FONSECA, 2009). A propagação vegetativa pelo método de enxertia é comumente utilizada, principalmente para fins comerciais, sendo os porta-enxertos propagados por sementes, pois garante a manutenção das características desejadas na espécie e formação de raízes mais resistentes (FARIA-SILVA; GALLON; SILVA, 2020).

Tradicionalmente essa espécie é cultivada em cerca de 100 a 200 árvores por ha e, eventualmente, crescem em espécimes grandes com 10 m de altura ou mais, dificultando a pulverização e a colheita em plantios comerciais (MENZEL; LE LAGADEC, 2017). Essa frutífera, possui folhas de cor variando de verde-claro a levemente acastanhado ou arroxeadado quando as plantas são jovens e adquire uma cor verde escura à medida que se desenvolve e se torna maduro. A cor da superfície abaxial da folha é menos intensa do que a do lado superior da folha (superfície adaxial) (VIECCELLI et al., 2016).

Originária de estações climáticas bem definidas, a *M. indica* necessita de uma estação seca para a fase vegetativa, a qual a planta irá se desenvolver e criar condições necessárias para a produção de frutos, tendo essa fase início na diferenciação floral, a qual se efetua normalmente pouco depois do final da estação chuvosa e o florescimento ocorre durante os

meses secos (PÉREZ et al., 2012). No Brasil são necessários em média anualmente de pelo menos de 750 mm a 1600mm de precipitação, de temperatura entre 20 °C e 30 °C, e de ocorrência de, no mínimo, dois meses consecutivos com precipitação inferior a 25 mm para se cultivar a espécie (MOURA et al., 2015). A cultura da manga tolera uma grande variação climática, mas é essencial ter a temperatura e a precipitação dentro de uma faixa bem definida, tendo como temperatura mínima absoluta suportada de 1 a 2°C (no abrigo meteorológico), uma vez que são plantas pouco tolerantes à baixas temperaturas, suportando risco máximo de geadas severas de 15% (1 geada a cada 5 anos) (SINGH, 1978).

Os eventos fenológicos floração e frutificação são afetados fortemente pela variação da temperatura e precipitação pluviométrica o que afeta a produtividade das culturas (ABER; MELILLO, 2001). Dentre esses eventos, a floração da *M. indica* é afetada pelo clima, sendo a umidade do ar o elemento climático essencial para o estímulo da brotação das flores, por sua vez a ocorrência de chuvas nesta fase são desfavoráveis, sendo fundamental a presença de um período seco durante o ano para o sucesso do cultivo comercial dos pomares (MOUCO, 2010).

A temperatura também é um fator climático determinante para o crescimento e desenvolvimento dessa espécie, a qual tendem a crescer vegetativamente e florescer irregularmente em condições de temperaturas diurnas acima de 30 °C e noturnas de 25 °C, tendo como condição ótima para o processo fotossintético a faixa térmica situada entre 24 °C a 26 °C, onde temperaturas elevadas como as muito baixas prejudicam o crescimento, o desenvolvimento e a produção da cultura (CORDEIRO; BORGES, 2020). Na região nordeste do Estado do Pará, as temperaturas basais inferior e superior para a cultura da mangueira foram de 13 °C e 32 °C, respectivamente, já a exigência térmica média encontrada para a mangueira atingir o ponto de colheita comercial foi de 1.024,23 °C dia<sup>-1</sup> a 1.157,99 °C dia<sup>-1</sup> e a duração média do ciclo da mangueira foi de 110 a 112 dias (RODRIGUES; SOUZA; LIMA, 2013).

Rodrigues et al. (2015), ao estudarem o impacto da temperatura do ar na produtividade da *M. indica* das cultivares *Tommy Atkins* e *Kent*, na cidade de Petrolina, PE, constataram que o aumento da temperatura média mensal a partir de 3°C afeta negativamente a produção da mangueira, reduzindo quase o dobro da produtividade observada com o aumento de 1°C. No estudo desenvolvido por Moura et al. (2015), sobre a aptidão climática

da mangueira frente ao clima atual e aos cenários futuros do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) no Brasil para os anos de 2025 e 2055, informaram que os cenários indicam redução no número de municípios aptos ao cultivo da mangueira em condições naturais, ou seja, sem a necessidade de irrigação, em médio e longo prazo.

No Brasil, a região do semiárido é a principal responsável pelo maior número de exportação de manga nacional, que apesar da baixa disponibilidade hídrica, a região favorece altos níveis de radiação solar para a cultura o que é benéfico a mangicultura irrigada, por meio da maior produção de frutos e redução de doenças, contudo é necessário o manejo da espécie com poda dos ramos para que haja entrada de luminosidade em toda folhagem no interior do dossel (MOUCO, 2010). Conforme Menzel e Le Lagadec (2017), a distribuição de luz dentro da copa é um fator determinante na alocação dos recursos de nitrogênio e carbono para a realização do potencial fotossintético, uma vez que plantios muito adensados causam sombreamentos e diminuem a produtividade da espécie. No estudo de Rodrigues, Souza e Lima (2013), foi verificado que a espécie *M. indica* L., exige um nível relativamente alto de irradiância solar para saturar a fotossíntese e completar seu ciclo produtivo. Além da captação da energia solar, as condições hídricas do solo e da atmosfera também afetam a produtividade da espécie em muitos locais (CAMPOS et al., 2008).

Em termos de necessidades hídricas, a manga é significativamente resistente à seca, em virtude do seu sistema radicular capaz de atingir profundidades no solo, sobrevivendo até 8 meses sem precipitação. Todavia, em regiões baixa pluviosidade e alta demanda de evapotranspiração é necessário o sistema de irrigação para o abastecimento de água para o vegetal (SILVA et al., 2020). Zuazo et al. (2019), verificaram em seus estudos que a manga quando cultivada em plena demanda hídrica (100% ETC) utiliza o recurso hídrico com eficiência na produção de seus frutos, concluindo sobre a necessidade de otimizar o uso da água de irrigação de acordo com as necessidades reais de manga.

Além da temperatura, a velocidade do vento é determinante no processo de evapotranspiração da cultura, onde o ar quente próximo à superfície rugosa da folhagem transfere energia, aumentando o fluxo do vapor d'água dos pomares para a atmosfera. Desta forma, o consumo hídrico da cultura depende, em grande parte, da turbulência do ar, que por sua vez é afetada pela rugosidade das árvores altas e de suas arquiteturas. Por outro lado,

fortes ventos durante a frutificação causam a queda prematura de frutos.

### 3.1.1 Aspectos socioambientais da cultura da manga

A manga é considerada uma das frutas mais procuradas no mundo, tendo uma forte importância econômica e social, por envolver inúmeras oportunidades de empregos diretos e indiretos, e também proporcionar inúmeros benefícios ambientais como o conforto térmico e nutricional (COELHO; SANTOS; SIMÕES, 2021; CORDEIRO; BORGES, 2020).

Na agricultura familiar essa frutífera contribui na dieta alimentar e no fornecimento de vários produtos, serviços e na renda familiar (GARCIA; VIEIRA; OLIVEIRA, 2015). Ela pode ser consumida in natura ou transformada em diversos produtos como polpa, suco, sorvete, geleias e compotas, além de possuir inúmeros benefícios nutricionais e medicinais (WALL-MEDRANO et al., 2015). Em comunidades rurais, diversas partes da espécie *M. indicam* L como folha, fruto, semente, casca, raiz, flor e broto são utilizadas na medicina popular, para o tratamento de diabetes, reumatismo, desintéria e gripe (GUEVARA, 2004; LIMA et al., 2019).

O cultivo de manga voltado para o mercado tem crescido significativamente, conforme Valadares e Landau (2020), a demanda por essa fruta vem se expandido tanto no mercado interno quanto no externo, o que tem exigido a adoção de tecnologias que melhorem a qualidade e produtividade da espécie. O aumento do consumo dessa fruta tem causado mudanças no padrão de produção do cultivo da manga por muitos produtores, que na perspectiva de exportar a cultura, se adaptaram às exigências que eram ditadas pelo mercado internacional, optando por variedades como a Tommy Atkins, que possuíam características essenciais para a exportação, como resistência ao manuseio e transporte. Essa expansão aumenta as perspectivas de mão de obra e renda dos produtores que manuseiam a cultura (MACHADO et al., 2017).

A automação de algumas práticas agrícolas na fruticultura tem reduzido o nível de empregos nessa atividade, porém tem aumentado a demanda por profissionais qualificados e serviços especializados tanto no processo produtivo quanto nas atividades pós-colheita (embalagem, empacotamento e classificação), em detrimento da mão-de-obra menos especializada. Além disso, os serviços terceirizados no ramo da fruticultura envolvem um grande contingente de trabalhadores qualificados vinculados as empresas envolvidas ou

prestando serviços por conta própria (SOUZA et al., 2005). A adoção de técnicas de irrigação no ramo da fruticultura também gera novos postos de emprego, contudo a ausência ou a má gestão e fiscalização do uso da água tem contribuído para a intensa exploração e poluição dos recursos naturais, como é o caso do Vale do Açu-RN, provocando graves impactos ambientais que se apresentam como desafios importantes para o futuro da região (ALVES; AQUINO; SILVA FILHO, 2018).

Além disso, segundo Oliveira (2021), no ramo da fruticultura ainda é comum observar que os pequenos produtores rurais trabalham de forma isolada e essa falta de união pode resultar em desvantagem na agregação de valor e na comercialização de suas mercadorias, sendo necessário a intervenção de políticas públicas e privadas na região para que houvesse a cooperação entre os pequenos produtores rurais.

### **3.2 Evapotranspiração da cobertura vegetal**

A evapotranspiração é um termo que compreende os fenômenos de evaporação e transpiração que ocorrem simultaneamente na natureza (GAN; LIU, 2020). As plantas assimilando CO<sub>2</sub> atmosférico através do processo de fotossíntese, e também transpiram água para a atmosfera e, assim, influenciam a temperatura da superfície (PAUL-LIMOGES et al., 2020). Já o processo da evaporação se dá pela interação da disponibilidade de água na superfície do solo e da radiação solar nessa superfície, sendo este fenômeno inversamente proporcional a área coberta pela cultura (QUBAJA et al., 2020).

Assim, a cobertura vegetal tem uma participação determinante no regime hídrico da natureza, atuando por meio do sistema solo-atmosfera, interceptando e redistribuindo a precipitação, aumentando a infiltração e levando a uma redução na taxa de evaporação da superfície do solo (GUAN; DONG, 2018; MORILLAS et al., 2017).

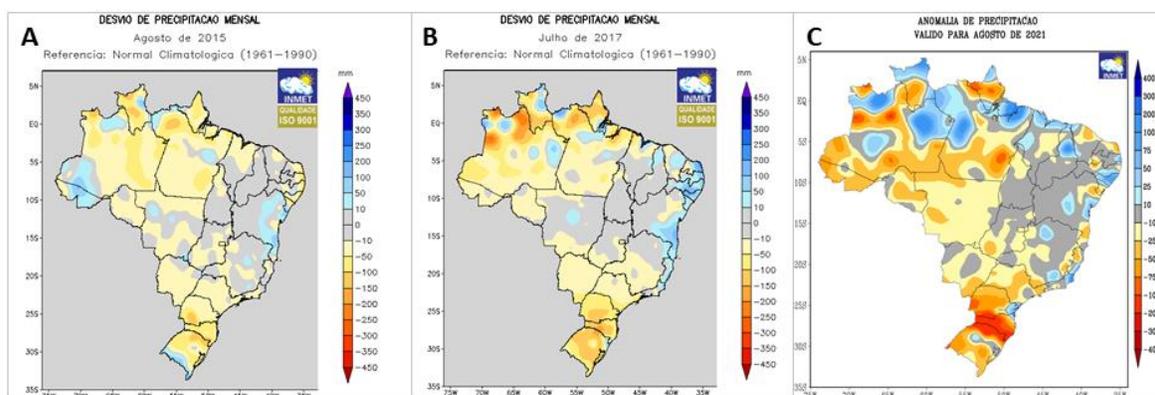
Souza et al. (2016), ao estudarem o consumo de água em um pomar de mangueiras cv. Tommy Atkins durante seus estágios fenológicos no nordeste do Estado do Pará, concluíram que as condições climáticas afetam a demanda hídrica da cultura, sendo a fase de queda dos frutos a que apresentou o maior consumo de água, e a fase de maturação a de menor consumo, tendo em média uma ET de 3,73 mm dia<sup>-1</sup>.

A evapotranspiração é um dos parâmetros do ciclo hidrológico que necessita de métodos indiretos para sua estimativa e necessita de várias informações climatológicas,

sendo essas específicas para cada localidade e cultura (JERSZURKI; DE SOUZA; SILVA, 2019). Dentre as técnicas aplicáveis, o sensoriamento remoto tem sido um dos mais utilizados para a representação espacial desse fenômeno hidrológico, todavia dependendo do modelo pode ocorrer alguns erros de estimativas na modelagem dos valores da evapotranspiração (TALSMA et al., 2018). No estudo de Longo-Minnolo et al. (2020), por exemplo, a heterogeneidade do pixel, causado pelas superfícies de solo com vegetação e sem vegetação influenciou os resultados obtidos da evapotranspiração, sendo necessário utilizar modelos que integre dados baseados no solo ou imagens de alta resolução.

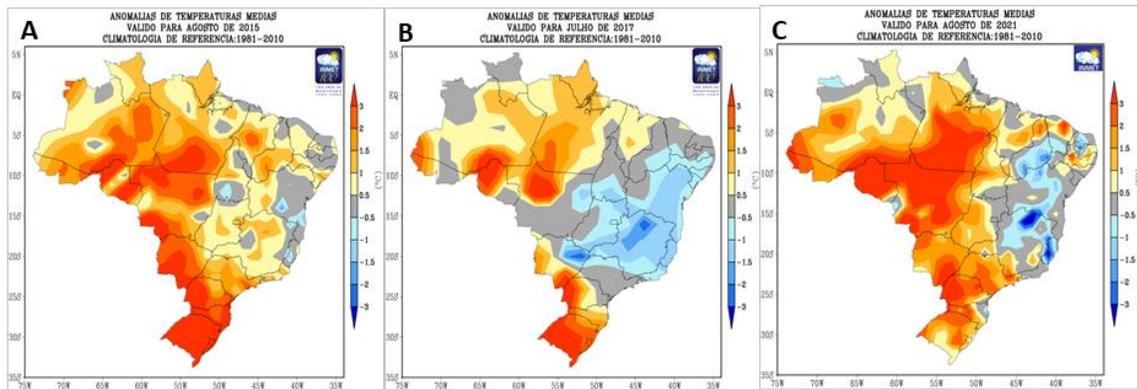
Conforme dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), o ano de 2015 foi marcado pela sensação de calor maior que em anos recentes, também muito quentes. Segundo Pinheiro (2017), durante a ocorrência mais intensa do El Niño apontados em 7 (sete) anos (1981-1983-1992-1997-1998-2012 e 2015), as chuvas totais anuais registraram uma redução significativa do seu volume pluviométrico anual. O Mapa do INMET mostra a a distribuição espaço-temporal das variáveis climáticas com anomalias da precipitação e da temperatura em nível nacional, referente aos períodos da pesquisa (agosto/2015; julho/2017 e agosto/2021 (Figura 1 e 2).

Figura 1 Mapa da distribuição espacial da Precipitação para o período de agosto/2015 (A), julho/2017 (B) e agosto/2021 (C).



Fonte: INMET (2022).

Figura 2- Mapa da distribuição espacial da Temperatura para o período de agosto/2015 (A), julho/2017 (B) e agosto/2021 (C).



Fonte: INMET (2022).

### 3.3 Método de Penman Monteith FAO 56

A evapotranspiração de referência pode ser determinada por métodos baseados na temperatura do ar como a equação de Penman-Monteith e métodos do balanço de energia como os baseados na razão de Bower.

O método Penman-Monteith FAO (Food and Agriculture Organization) é recomendado por muitos estudos como o mais eficaz para determinar a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) utilizando dados meteorológicos. Esse método é derivado do método original criado em 1948 por Penman, que combinou parâmetros como, temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade, responsáveis pela troca de energia e o fluxo de calor latente provenientes de extensões uniformes de vegetação (SEDIYAMA, 1996).

O principal objetivo da criação da  $ET_0$  pela FAO foi de ter uma unidade padrão para comparar a evapotranspiração das culturas em diferentes regiões (ALENCAR; SEDIYAMA; MANTOVANI, 2015). Apesar da  $ET_0$  ser um indicativo da demanda hídrica das culturas de um determinado local e período, ela é afetada somente pelos elementos atmosféricos presentes, sendo totalmente dependente da escala temporal objetivada pelo pesquisador (CARVALHO et al., 2011).

Carvalho et al. (2011) define a  $ET_0$  como sendo a taxa de evapotranspiração a partir de uma cultura de referência hipotética, cujas características ficam próximas a uma superfície extensiva de grama verde com altura de 0,12 m, albedo de 0,23, e uma resistência de superfície fixa de 70 s/m. Conforme Alencar, Sedyama e Mantovani (2015), esse é

considerado um método prático e acessível, pois a maioria dos parâmetros podem ser medidos ou podem ser facilmente calculados por meio de dados meteorológicos.

A  $ET_0$  pode ser calculada por dados meteorológicos. A equação 1 descreve como são obtidos os valores de evapotranspiração de referência horária ( $ET_0$ , h), a integração desta permite calcular a evapotranspiração de referência diária ( $ET_0$ , 24h) pelo método de Penman-Monteith FAO-56.

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

Em que:  $\Delta$  = tangente à curva de pressão de vapor na saturação a  $T_h$ ,  $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ;  $Rn$  = Saldo da radiação diário,  $MJ \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ;  $G$  = fluxo de calor no solo,  $MJ \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ;  $\gamma$  = constante psicrométrica,  $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ;  $U_2$  = velocidade do vento a 2m de altura,  $m \text{ s}^{-1}$ ;  $e_s$  = pressão de saturação do vapor do ar,  $kPa$ ;  $e_a$  = pressão atual de vapor do ar,  $kPa$  e  $T_h$  = temperatura média do ar de hora em hora,  $^\circ C$ .

### 3.4 Balanço de energia pela Razão de Bowen

A radiação solar é a principal fonte de energia capaz de manter a vida na terra. Ela influencia as condições climáticas, hidrológica e a biosfera como um todo, sendo uma das principais responsáveis pela interação solo-planta-atmosfera (PEREIRA; NOVA; ALFARO, 2009).

A dinâmica da emissão de energia emitida pelo Sol e interceptado pela Terra, obedecem à Lei de Stefan-Boltzmann, onde as ondas curtas que interceptam o planeta causam o aumento da sua temperatura e por consequência ele emite ondas longas para seu interior, sendo parte da energia absorvida pelo solo, vegetação, gases atmosféricos e a outra parte refletida e espalhada de volta para o espaço (GÓMEZ et al., 2018). A quantidade de radiação solar incidente depende da estação do ano, horário do dia e da latitude da região (QUERINO et al., 2017).

Segundo a Lei de conservação de energia, os ganhos e as perdas de energia em uma superfície estão em equilíbrio, podendo ser quantificadas pelo balanço de radiação e saldo de energia (CALLEJAS et al., 2016). A primeira faz referência na quantificação líquida ( $Rn$ ) dos fluxos das radiações de onda curta e de onda longa recebida e emitida pela superfície.

Enquanto, a segunda estima os fluxos de calor sensível do solo (G), do ar (H) e do calor latente responsável pela evaporação da água (LE) (MACHADO et al., 2014).

O saldo de radiação é essencial no processo de evapotranspiração, sendo dependente dos fluxos de calor sensível e latente, em geral, o seu valor é positivo durante o dia, pois a radiação solar aquece a superfície do solo, permitindo que esse emita ondas longas para o aquecimento do ar, para a evaporação da água e para aquecimento de camadas mais profundas do solo. Por outro lado, durante a noite, o saldo é negativo, devido a ausência do sol como fonte primária da radiação (PEZZOPANE; PEDRO JÚNIOR; GALLO, 2005). Em relação ao calor do solo, a quantidade de energia do  $R_n$  utilizada para aquecê-lo é altamente dependente da condição, textura e ocupação do solo (SOARES, 2013).

Em local de grande densidade vegetativa, as folhas absorvem uma grande quantidade de radiação solar, impedindo a incidência direta e fazendo com que tenha uma distribuição adequada para o solo e para o ambiente (MACIEL et al., 2002). A evapotranspiração influenciada pelo fluxo de calor latente demanda muita energia e esse processo possui um papel fundamental para o balanço de radiação, pois os gases e aerossóis fazem com que tenha um espalhamento da incidência solar (MACHADO et al., 2016).

Em ecossistemas de terra úmida, o fluxo de calor latente consome maior parte da radiação líquida disponível, já em regiões com restrições hídricas, o maior consumo é priorizado ao fluxo de calor sensível. Segundo Souza Filho et al. (2005), a evapotranspiração, durante a manhã, tem um maior controle realizado pela disponibilidade de energia, quando comparado ao período menos chuvoso. No turno da tarde o dossel de uma floresta tropical tende demonstra maior controle superficial na transpiração.

Segundo Borges et al. (2008), o fluxo de calor em uma superfície pode ser obtido pela estimativa do saldo de radiação ( $W\ m^{-2}$ ) que é a somatória do calor latente (LE), do calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G), conforme a seguinte Equação:  $R_n = G + H + LE$ . Em superfícies vegetadas, o método da razão de Bowen (1926), determinado pela equação  $\beta = H/LE$ , tem sido utilizado para estimar a fração de energia disponível convertida em calor sensível e latente, isto é, quantidade de energia utilizada para aquecer o ar e para evaporar a água (PEREIRA et al., 2021). A quantificação dos fluxos é feita na camada de ar próxima à superfície do solo. Segundo Silva et al. (2016), o método da razão de Bowen –Balanço de energia subestima a evapotranspiração de referência nos horários próximos ao nascer do sol,

devido aos pequenos gradientes de temperatura e umidade do ar. Nos demais horários, o método superestima a evapotranspiração. Cardoso et al. (2005) afirmam que a posição dos psicrômetros, instrumento utilizado para obter as variáveis meteorológicas, apresentam grande influência sobre o desempenho da metodologia nas estimativas da evapotranspiração de referência.

### **3.5 SEBAL e Componentes do Balanço de energia**

O algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) foi projetado em 1995 no Egito por Bastiaanssen para estudos de fluxos de calor e estimativas da evapotranspiração em escala regional se utilizando de imagens de satélites e poucos dados meteorológicos como temperatura do ar, radiação e velocidade do vento (MENEZES et al., 2009; BASTIAANSEN, 2000). Tem sido um dos métodos bastante utilizado na determinação do consumo hídrico e produtividade das culturas e análise de impactos ambientais (ANDRADE et al., 2014; TARTARI et al., 2015).

Por meio da aplicação desse algoritmo é possível de obter: o Albedo de Superfície, o Índice de vegetação, a Temperatura de superfície, o Saldo de Radiação, o Fluxo de Calor no Solo, o Fluxo de Calor Latente e a evapotranspiração (VELOSO et al., 2015). Essa é resultante do resíduo da equação do balanço de energia à superfície, tendo como variáveis o fluxo de calor sensível, o fluxo de calor no solo e o saldo de radiação.

Dessas variáveis, o saldo de radiação é determinante no balanço de energia, envolvendo vários procedimentos para sua obtenção, como correção atmosférica do albedo, obtenção de índices de vegetação e de emissividades termal e da superfície (ALVES et al., 2017). Já a estimativa da densidade de fluxo de calor no solo é determinada pelo NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), temperatura da superfície, albedo e  $R_n$ , sendo o resultado influenciado pela condição, textura e ocupação do solo (FAUSTO et al., 2016).

O saldo de radiação é essencial no processo de evapotranspiração, sendo dependente dos fluxos de calor sensível e latente, em geral, o seu valor é positivo durante o dia, pois a radiação solar aquece a superfície do solo, permitindo que esse emita ondas longas para o aquecimento do ar, para a evaporação da água e para aquecimento de camadas mais profundas do solo. Por outro lado, durante a noite, o saldo é negativo, devido a ausência do

sol como fonte primária da radiação (PEZZOPANE; PEDRO JÚNIOR; GALLO, 2005). Em relação ao calor do solo, a quantidade de energia do Rn utilizada para aquecê-lo é altamente dependente da condição, textura e ocupação do solo (SOARES, 2013).

Contudo, o fluxo do calor sensível, obtido por meio da velocidade do vento, velocidade de fricção e temperatura de superfície é o diferencial no algoritmo SEBAL que considera a estabilidade atmosférica por meio de um processo iterativo. Para isso é necessário selecionar dois pixels extremos, como um “pixel quente” localizado em um ambiente seco e sem vegetação, e um “pixel frio”, localizado em uma área bem irrigada e vegetada ou até mesmo um corpo hídrico (COSTA JÚNIOR; DOS SANTOS; SILVA, 2017). Conforme Mendonça et al. (2012), em regiões de clima úmido ou sub-úmido a identificação do pixel quente é uma das grandes dificuldades encontradas pelos pesquisadores, propondo o H-PESAGRO como alternativa para essa exigência da equação SEBAL.

Em ecossistemas de terra úmida, o fluxo de calor latente consome maior parte da radiação líquida disponível, já em regiões com restrições hídricas, o maior consumo é priorizado ao fluxo de calor sensível. Segundo Souza Filho et al. (2005), a evapotranspiração, durante a manhã, tem um maior controle realizado pela disponibilidade de energia, quando comparado ao período menos chuvoso. No turno da tarde o dossel de uma floresta tropical tende demonstra maior controle superficial na transpiração. Segundo Borges et al. (2008), o fluxo de calor em uma superfície pode ser obtido pela estimativa do saldo de radiação ( $W m^{-2}$ ).

O SEBAL é processado por meio de etapas computacionais, que preveem uma avaliação completa da radiação solar e da energia na superfície da Terra. Esse algoritmo utiliza satélites multiespectrais de média e alta resolução que possuem sensores que coletam comprimentos de onda nas bandas do visível, infravermelho próximo e termal, como o dos satélites Landsat 5, 7 e 8 (SILVA, 2018).

Em local de grande densidade vegetativa, as folhas absorvem uma grande quantidade de radiação solar, impedindo a incidência direta e fazendo com que tenha uma distribuição adequada para o solo e para o ambiente (MACIEL et al., 2002). A evapotranspiração influenciada pelo fluxo de calor latente demanda muita energia e esse processo possui um papel fundamental para o balanço de radiação, pois os gases e aerossóis fazem com que tenha um espalhamento da incidência solar (MACHADO et al., 2016).

### 3.6 Serviços ecossistêmicos e uso e cobertura do solo

Os serviços ecossistêmicos são descritos por Costanza et al. (1997) como os benefícios obtidos de forma direta ou indireta de um ecossistema, o que inclui a função de regulação (danos naturais, climática), de suporte (formação do solo e ciclagem de nutrientes), de produção (biomassa e fornecimento de alimentos) e cultural (recreação e espiritualidade).

A floresta Amazônica é um dos ecossistemas que exerce um papel fundamental no ciclo d'água, por meio da evapotranspiração, no clima, por meio da relação com os fenômenos El Niño e La Niña no clima. Além de agir na desintoxicação de poluentes, no controle de pragas da agricultura e vetores de doenças, no ciclo do carbono, do nitrogênio e de outros nutrientes fundamentais à vida e à produção de alimento, no conhecimento de princípios ativos da programação genética de micro-organismos, plantas e animais que têm aplicação como medicamentos (ALHO, 2012).

No nordeste paraense, a precipitação local é fortemente influenciada pela brisa marítima da região, sendo mais intensa durante o período chuvoso (março) em relação ao período menos chuvoso (agosto) (GERMANO et al., 2017). Segundo Limberger e Silva (2016), as chuvas na bacia amazônica são afetadas principalmente pelo fenômeno ENOS (El Niño-Oscilação Sul), o que resulta em períodos mais secos na sua fase quente e úmido na sua fase fria. Além disso, a variabilidade da precipitação também é influenciada pelo oceano Atlântico, especialmente por modular o posicionamento da ZCIT e o transporte de umidade para a bacia amazônica.

A disponibilidade da precipitação é afetada diretamente pelas mudanças no uso e na cobertura da terra, sendo objeto de estudo de muitos pesquisadores como ferramenta para políticas públicas (JOSEPH, et al., 2019). De acordo com Alho (2012), as alterações ambientais causam a perda acelerada da biodiversidade, por meio da modificação e perda de habitats naturais e pela ocupação não sustentável do solo, com propagação de patógenos e vetores de doenças.

As mudanças da paisagem realizada principalmente em ambiente urbano possuem grande impacto nas relações entre os ciclos energéticos e hidrológicos sobre a superfície. Conforme Pimentel e Silva (2013), as áreas vegetadas, assim como os corpos hídricos, desempenham um importante papel na amenização das temperaturas, principalmente em períodos de maiores temperaturas no ano.

A ausência de cobertura vegetal implica, ainda, na maior reflexão da radiação de ondas curtas e maior emissão de radiação de ondas longas, reduzindo o saldo de radiação da superfície (ANDRADE et al., 2018), e faz com que a energia disponível ao ambiente seja utilizada prioritariamente, no fluxo de calor sensível, aquecendo o solo e o ar (SABINO et al., 2022). Em contrapartida, ambientes vegetados, por utilizarem a maior parte do saldo de radiação nos processos de evapotranspiração (calor latente), tendem a aumentar o conteúdo de vapor d'água disponível no ambiente e reduzir os valores de temperatura máxima.

A temperatura do ar é uma importante variável climática altamente influenciada por mudanças na cobertura vegetal, causam redução dos processos de evapotranspiração (PIMENTEL; SILVA, 2013), alterando o particionamento e a magnitude do balanço de radiação, albedo e fluxos de calor latente e sensível.

Estudos demonstram que os serviços ecossistêmicos podem ser quantificados e valorados economicamente, sendo a mensuração do fluxo de carbono o índice mais consolidado desde a Conferência de Kyoto no Japão, em 1997 (OLIVEIRA; GANEM; BAPTISTA, 2017). O conhecimento dos componentes do balanço de energia, principalmente em áreas urbanas tem sido utilizado para analisar de forma indireta a relação dos serviços ecossistêmicos com as mudanças climáticas (MOREIRA et al., 2017).

Em ambientes ensolarados como o litoral amazônico paraense, o serviço ambiental que as árvores proporcionam são notados basicamente pela sensação do bem-estar provocado pela sombra refrescante e aumento da umidade. No vilarejo de Cuiarana, o qual está localizado no município de Salinópolis a 220 km de Belém, tem sido possível vivenciar essa sensação, principalmente pela presença de cuiaraneiras que é uma árvore robusta que deu origem ao nome do vilarejo. Esse lugar, ainda possui aspecto de colônia pesqueira com portos e praias, sua população atinge cerca de 250 famílias com 1400 pessoas. É uma localidade muito procurada por veranistas que são atraídos pelo clima bucólico, ventilado e com fácil acesso (GUERRA; PAIVA, 2016).

Os manguezais presentes nesse vilarejo são economicamente estratégicos para o desenvolvimento sustentável local, pois interrelaciona as dimensões econômicas, sociais e ambientais. Ele fornece bens de alta demanda e alto valor de mercado durante todo o ano, sendo o período menos chuvoso, o período de maior acessibilidade ao mangue para a captura ativos, como os mexilhões, sarnambi, peixes e lagostins. Além disso, o mangue é responsável

por armazenar uma grande quantidade de carbono atmosférico e orgânico, sendo essencial para a preservação ambiental e a economia local (RODRÍGUEZ et al., 2019).

A preservação dos manguezais é fundamental para preservação dos recursos hídricos e sua biodiversidade, eles também atuam como filtros biológicos, retendo partículas, poluentes e impurezas em suspensão na água (SOUZA et al., 2018). O uso contínuo e irregular do solo tem diminuído a disponibilidade hídrica em muitos locais, resultando no saldo negativo do balanço hídrico climático, em virtude da evapotranspiração potencial ser maior ou igual à folha precipitada (LIBERATO; BRITO, 2010).

### **3.7 Sensoriamento remoto**

A técnica de sensoriamento remoto por meio de imagens de satélites tem sido utilizada para estimar diferentes parâmetros estruturais da vegetação, sendo possível avaliar desde a produtividade de uma cultura até a sua vulnerabilidade ambiental (FERRER et al., 2020; RUDKE et al., 2020). Essa técnica é composta pelos processos de detecção, aquisição e análise (interpretação e extração de informações) da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos (SANO et al., 2020).

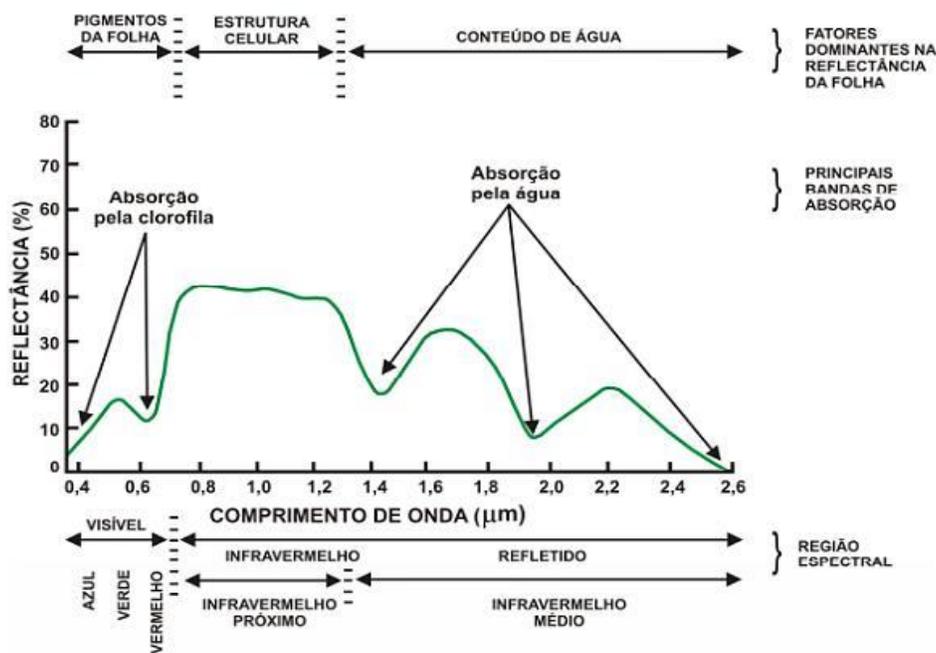
Em relação as plantas, as folhas são os principais órgãos que contribuem na emissão de energia detectada pelos sensores ópticos (HERNÁNDEZ-CLEMENTE et al., 2019). Muitos estudos têm utilizado a fluorescência da clorofila induzida pelo sol para rastrear a atividade fotossintética da vegetação, afim de melhorar a estimativa da produtividade primária bruta e detectar o estresse das plantas (YANG et al., 2020).

A radiação solar ao incidir em um vegetal, ativa uma complexidade de mecanismo fisiológica na folha nos comprimentos de onda visíveis e no infravermelho próximo (400 – 800 nm). Essa ativação permite a realização da absorvância, refletância e transmitância pelo complexo de pigmento-proteína presentes no tecido foliar (VAN WITTENBERGHE et al., 2019). Conforme Dechant et al. (2020), a utilização do sensoriamento remoto baseado na fluorescência da clorofila para estimar a fotossíntese ao nível foliar não pode ser diretamente aplicada à interpretação, devido a interação da estrutura do dossel que pode causar forte dispersão da refletância da vegetação no infravermelho próximo, sendo necessário estudos em que integre fatores estruturais, bioquímicos e fisiológicos.

A refletância é uma das principais etapas da dinâmica de energia eletromagnética a

ser utilizado nas técnicas de sensoriamento remoto, por representa o sinal detectado pelos sensores remotos (HERNÁNDEZ-CLEMENTE et al., 2019; VAN WITTENBERGHE et al., 2019). Yang et al. (2020), afirmam que aplicação do índice de vegetação de correção de fluorescência, obtido pela diferença entre a refletância visível no infravermelho próximo (NIR) e visível em banda larga (VIS, 400-700 nm) adquirida sob a mesma geometria idêntica das medições de fluorescência da clorofila induzida pelo sol diminui o erro de estimativa fotossintética do vegetal. Em folhas saudáveis a energia eletromagnética é refletida de 40 a 60% e transmitida de 45 a 50%, porém em planta estressada ou morta essa energia é maior consumida (JENSEN, 2009). Conforme Cemin (2009), uma vegetação verde consome as bandas vermelho e azul do espectro visível e não consome a banda do infravermelho, sendo somente a água absorvida nessa região do espectro (Figura 3).

Figura 3- Comportamento espectral da vegetação



Fonte: (CEMIN, 2009).

Hernández-Clemente et al. (2019), evidenciam que fatores como a temperatura da vegetação, fluorescência da clorofila, regulação negativa da energia fotossintética e pigmentos fotossintéticos detectados por sensoriamento remoto são fundamentais para monitorar as respostas precoces das plantas a diferentes estressores. Assim, por meio dos indicadores de vegetação é possível analisar a resposta espectral da planta e inferir e monitorar a cobertura e o vigor da vegetação, quanto ao seu estado nutricional e ao estresse hídrico, por exemplo (PÔÇAS et al., 2020). Esses indicadores são obtidos por meio de transformações matemáticas, que se valem das propriedades multiespectrais dos sensores remotos (POTOPOVÁ et al., 2020).

### 3.7.1 Landsat 8 TIRS/OLI

O satélite Landsat 8 foi lançado com sucesso no dia 11 de fevereiro de 2013 pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) e assim como seus antecessores vem fornecendo registros contínuos dos recursos naturais da Terra, incluindo agora estudos de áreas costeiras e detecção de nuvens do tipo cirrus (ZANETTI et al., 2017). A uma altitude de 705 km acima da terra, o Landsat 8 opera numa órbita heliosincrona com inclinação de

98,2° (ligeiramente retrógrada), semelhante às órbitas das séries Landsat 5 e 7, realizando uma passagem na linha do equador por volta das 10:00 horas (COELHO; CORREA, 2013).

A operação desse satélite é feita por meio de dois sensores imageadores, sendo o primeiro, o Operational Land Imager (OLI), com nove bandas espectrais no visual, infravermelho próximo e nas regiões espectrais de infravermelho de ondas curtas (SWIR). O segundo imageador é o Thermal Infrared Sensor (TIRS) que opera com duas bandas de pixel de 100 metros, processadas e disponibilizadas em 30 metros, a fim de garantir a correção atmosférica dos dados térmicos (COELHO; CORREA, 2013; ROZENSTEIN et al., 2014), descrito na Figura 4.

Figura 4 - Especificações das bandas espectrais dos sensores OLI e TIRS do Landsat 8.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
OLI (Operational Land Imager)	(B1) AZUL COSTEIRO	0.43 - 0.45 $\mu\text{m}$	30 m	16 dias	170 x 183 km	16 bits
	(B2) AZUL	0.45 - 0.51 $\mu\text{m}$				
	(B3) VERDE	0.53 - 0.59 $\mu\text{m}$				
	(B4) VERMELHO	0.64 - 0.67 $\mu\text{m}$				
	(B5) INFRAVERMELHO PRÓXIMO	0.85 - 0.88 $\mu\text{m}$				
	(B6) INFRAVERMELHO MÉDIO	1.57 - 1.65 $\mu\text{m}$				
	(B7) INFRAVERMELHO MÉDIO	2.11 - 2.29 $\mu\text{m}$				
	(B8) PANCROMÁTICA	0.50 - 0.68 $\mu\text{m}$	15 m			
	(B9) CIRRUS	1.36-1.38 $\mu\text{m}$	30 m			
TIRS (Thermal Infrared Sensor)	(B10) INFRAVERMELHO TERMAL	10.6-11.19 $\mu\text{m}$	100 m			
	(B11) INFRAVERMELHO TERMAL	11.5-12.51 $\mu\text{m}$	100 m			

Fonte: Landsat (2013).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada no pomar de manga do sítio experimental de Cuiarana e suas adjacências. A área está localizada na zona fisiográfica do Salgado do Estado do Pará, banhada pelo Oceano Atlântico, no município de Salinópolis, na mesorregião do Nordeste Paraense. Esse município é um dos principais pontos turísticos do litoral paraense, com uma população de 41.164 habitantes e uma área de 217.856 km<sup>2</sup>. Ele possui um vasto conjunto paisagístico atrativo para o turismo, como praias, extensas áreas com dunas de areia e uma significativa área de manguezal e apicum. Dentre as localidades deste município, encontra-se o vilarejo de pescadores, denominado de Cuiarana, distante 16 km de Salinópolis.

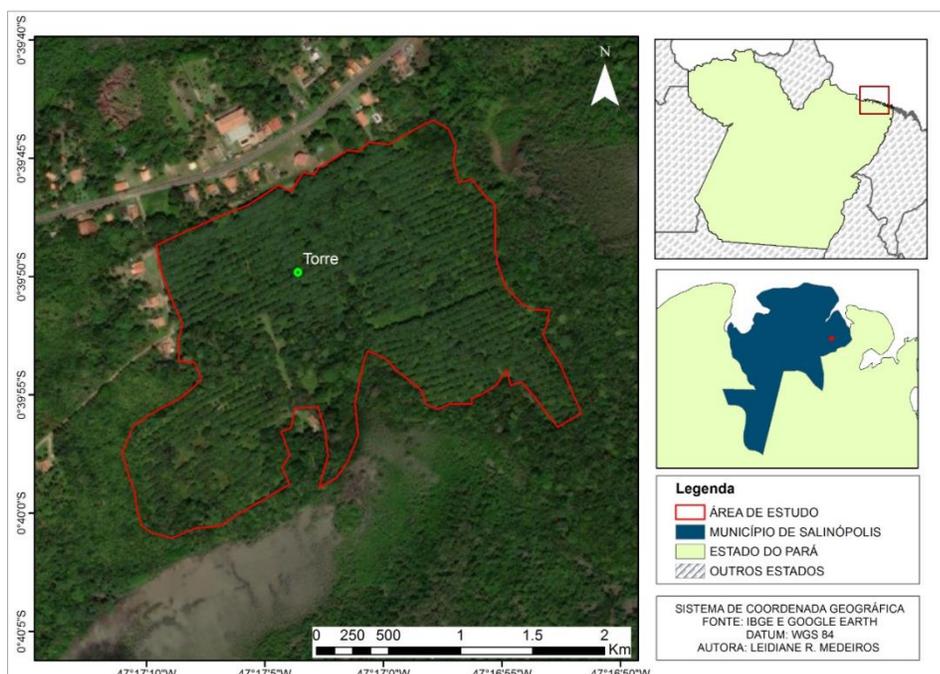
Nesse vilarejo encontra-se o sítio experimental Modesto Rodrigues, localizado em Cuiarana (0°39'49.72''S e 47°17'03.41''W) (Figura 6) instalado em uma área de cultivo de mangueira Tommy Atkins (Figura 5), pertencente à Universidade Federal do Pará (UFPA) e Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Esse pomar foi plantado para fins comerciais em 1993, em fileiras orientadas no sentido Leste-Oeste, com espaçamento de 10 x 10 m (100 plantas ha<sup>-1</sup>), perfazendo uma área total de aproximadamente 25ha (LIMA et al., 2012).

Figura 5-Pomar de mangueiras cultivadas no sítio experimental Modesto Rodrigues, Cuiarana, Salinópolis, PA.



Fonte: Da Autora.

Figura 6- Localização da área de estudo no sítio experimental Modesto Rodrigues, Cuiarana, Salinópolis, PA.



Fonte: Da Autora.

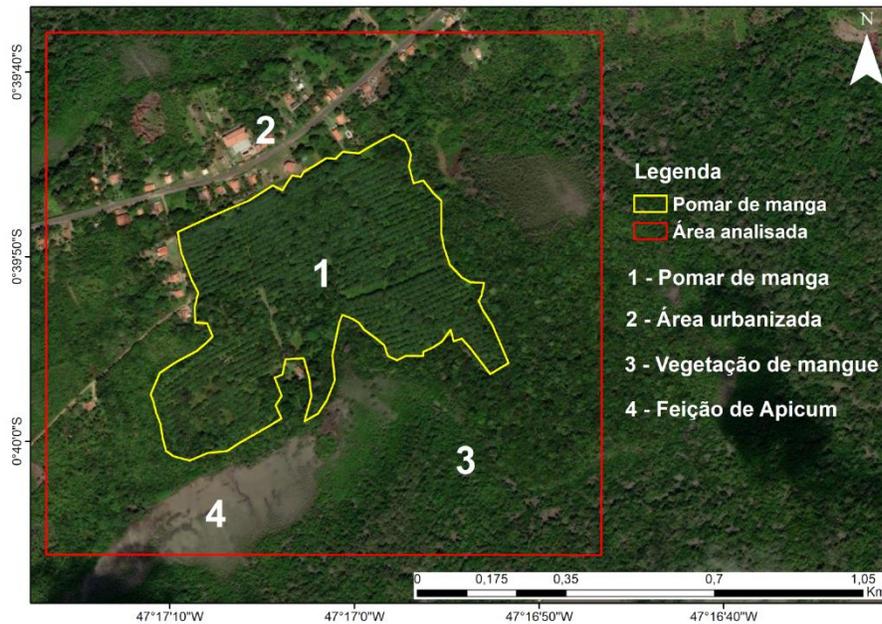
Nas adjacências do pomar de manga, encontra-se uma área em expansão urbana e de vegetação natural de mangue (BRASIL, 2018). Os manguezais são ecossistemas estratégicos economicamente para as famílias do vilarejo de cuiarana, assim como a atividade de pesca e turismo (RODRÍGUEZ et al., 2019; ARAÚJO et al., 2020).

A área contemplada de vegetação de mangue e de Apicum (Figura 7) estão localizados de forma contínua, na porção lateral direita e na porção inferior do pomar, respectivamente. A vegetação de mangue apresenta feições de floresta com espécies arbóreas sendo inundado por um sistema de macromarés de 4 a 6 m de altura máxima, com regime semidiurno. De maneira continuada, as feições de Apicum apresentam solo exposto com textura areno-lamosa e uma planície hipersalina com vegetação rasa nas encostas (SOUZA et al., 2018a).

Por sua vez, a área urbana do vilarejo de Cuiarana (Figura 7) está concentrada ao longo da estrada de Salinópolis, a qual fica, aproximadamente, a 50m de distância do pomar de manga. A área apresenta solo exposto nas proximidades das casas em alvenaria, assim como presença de densidade vegetal arbóreas, aparentemente possui baixa concentração de

pessoas e infraestrutura, sendo a estrada principal a única a ter o solo revestido com asfalto. Essa área está localizada na porção superior do pomar.

Figura 7- Recorte espacial da área analisada nesta pesquisa. Vila de Cuiarana, Salinópolis-PA.



Fonte: Da Autora.

O clima predominante na localidade é tropical, do tipo Aw (classificação Köppen e Geiger) com precipitação anual média de 2.750 mm, sendo os seis primeiros meses do ano os com maiores ocorrências de chuva, a temperatura média anual é de 27,7°C, umidade relativa de 82,5%, insolação de 2.100 h e ventos com velocidade média de 1,75 m s<sup>-1</sup> (RAMOS et al., 2009). Conforme o balanço hídrico do solo de Cuiarana, o primeiro semestre é o período de reposição hídrica na região, sendo março o mês com maior precipitação pluviométrica, já o segundo semestre é caracterizado pela redução de chuvas e aumento de temperaturas do ar, o que acarreta deficiência hídrica no solo pela perda de água por evapotranspiração do solo, entre os meses de junho e dezembro, sendo o mês de outubro o com maior taxa de infiltração (SILVA et al., 2018).

## 4.2 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados para a implementação do modelo SEBAL para o período juliano de 02/08/2015 (214DJ), 06/07/2017 (187DJ) e 02/08/2021 (214DJ) foram: Temperatura do ar, Umidade Relativa do ar, Pressão atmosférica, Radiação Global e Velocidade do vento, conforme descritos na Tabela 1. Os dias citados foram escolhidos por não apresentarem coberturas com nuvens sobre a área de estudo durante a passagem do satélite Landsat 8.

Tabela 1- Parâmetros utilizados na calibração e no cômputo do balanço de energia, balanço de radiação e suas componentes, obtidas das imagens Landsat 8 e da estação meteorológica automática. Cuiarana, Salinópolis-PA.

<b>Dia Juliano</b>	<b>214</b>	<b>187</b>	<b>214</b>
<b>Imagem (data)</b>	<b>02/08/2015</b>	<b>06/07/2017</b>	<b>02/08/2021</b>
<b>E (°)</b>	56,77	54,47	56,93
<b>Cos Z</b>	0,812	0,84	0,865
<b>Hora da passagem</b>	13:22:19	13:22:29	13:22:45
<b>Dr</b>	1,014	1,016	1,014
<b>Tar (°C)</b>	27,01	25,83	26,06
<b>UR%</b>	***	81,49	86,73
<b>Rs, 24h (W m<sup>-2</sup>)</b>	292,2	238,61	245,66
<b>Par (kPa)</b>	101,7	97,45	101,01
<b>U* (m.s<sup>-1</sup>)</b>	2,69	0,88	1,77
<b>Altura da velocidade do vento (m)</b>	10,5	10,5	10,5
<b>Transmissividade atmosférica (<math>\tau_{sw}</math>)</b>	0,57	0,48	0,54

**Legenda:** E (°) = Ângulo de elevação solar, cos Z = Cosseno do ângulo zenital solar, Hora: (Tempo Central GMT), Dr: Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol; Tar (°C): Temperatura do ar; UR %: Umidade relativa do ar; Par (kPa): Pressão atmosférica em Quilo Pascal; U\*(m.s<sup>-1</sup>): Velocidade do vento a 10,5m de altura.\*valor de umidade ausente.

Os parâmetros foram obtidos conforme os dias de obtenção das imagens do Landsat-8, pelos sensores da torre micrometeorológica de Cuiarana, localizada no município de Salinópolis, sob as coordenadas  $0^{\circ}39'49.72''S$  e  $47^{\circ}17'03.41''W$  na área experimental. A torre (Figura 8) possui 10m de altura e está equipada com quatro sensores conectados (Figura 9), sendo utilizado um Datalogger (CR1000) conjuntamente com um adaptador de cartão e um cartão de memória flash com capacidade para 1gb, para o registro e armazenamento dos dados mensurados. Ela também contém um Termo-higrômetro, Pluviômetro, Piranômetro e Net radiômetro como sensores, descritos na Tabela 2.

Figura 8- Torre micrometeorológica localizada no Sítio experimental de Cuiarana, Salinópolis-PA.



Fonte: Laudo nº 001/2018-EEC – Universidade Federal Rural da Amazônia.

Tabela 2- Instrumentos utilizados no monitoramento micrometeorológico em um pomar de manga, cv. Tommy Atkins, Salinópolis, Pará, Brasil.

<b>Parâmetro</b>	<b>Instrumento/Modelo/Fabricante/local</b>	<b>Altura (m)</b>
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
Fluxo do calor no solo	Flux plates, Hukseflux (HFP01SC-L)	0,10 m de profundidade
Umidade do solo	Soil Reflectometers (CS615)	0,30 m de profundidade

Fonte: Souza et al. (2016).

Figura 9- Sensores da torre micrometeorológica da área experimental de Cuiarana- PA: (A) Anemômetro; (B) Termo-Higrômetro, (C) Radiômetro e (D) Piranômetro.



Fonte: Da Autora.

### **4.3 Dados e imagens do Landsat 8**

Para a aplicabilidade do modelo SEBAL na estimativa da Evapotranspiração real, as imagens de satélite utilizadas foram captadas pelo sensor OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor) do satélite Landsat 8, o qual realiza a passagem com um intervalo de 16 dias com uma resolução de 30m espacial. Do sensor OLI utilizou-se as bandas multiespectrais 1 a 7 e 9 com resolução espacial de 30 metros e a banda pancromática 8, com resolução espacial de 15 metros. Do sensor TIRS utilizou-se as bandas térmicas 10 e 11, com resolução espacial de 100 metros, reamostradas para 30 metros. Essas bandas possuem resolução temporal de 16 dias e resolução radiométrica de 16 bits.

As imagens de satélites utilizadas foram adquiridas gratuitamente da plataforma United States Geological Survey (USGS), sendo obtidas da órbita/ponto 223/60 do imageamento do satélite, que recobrem a área de estudo, e onde está localizada a torre, sobre as coordenadas geográficas 0°39'49.72''S e 47°17'03.41''W, em formato Geotiff, projeção cartográfica UTM Zona 23S sistemas de coordenadas geodésicas e Datum WGS-84. As datas de seleção das imagens foram correspondentes aos dias 02/08/2015 (214DJ), 06/07/2017 (187DJ) e 02/08/2021 (214DJ) do período juliano, conforme apresentadas na Tabela 1. A seleção das imagens foi realizada considerando a cobertura espacial da área de estudo e a distribuição temporal que permitisse estudar os diferentes períodos do ano, sendo adotado como fator fundamental a menor interferência de nuvens na cena analisada, proporcionando uma melhor qualidade de processamento, atendendo os requisitos da pesquisa.

### **4.4 Processamento das imagens**

O processamento digital das imagens de satélites foi executado pelo software ERDAS Imagine versão 2015 e as operações matemáticas das imagens foram executadas com a ferramenta Model Maker e por fim complementado com o refinamento na produção dos mapas com ArcGis versão 10.8.

A partir dos dados orbitais, as imagens foram reprojetaadas, assumindo o Datum WGS84 e Fuso 23S. As áreas foram classificadas pelo método de classificação supervisionada, com o classificador Maxver-ICM para processar os dados. O processamento das imagens deu início com o empilhamento de todas as bandas dos sensores OLI e TIRS, após serem recortadas para a área analisada, para assim serem obtidos os diferentes

componentes de balanço de energia. Além da posterior vetorização de área de vegetação nativa, áreas adjacentes de vegetação de mangue e área urbanizada, para auxiliar nas análises das estimativas geradas pelo SEBAL.

Os dados meteorológicos de superfície foram necessários para realizar as correções e calibração das imagens de Landsat 8. Além de possibilitar realizar as estimativas de evapotranspiração diária utilizando o modelo de PenmanMonteith FAO-56 (ALLEN et al., 1998), permitindo relacionar os dados em campo com os valores obtidos utilizando o algoritmo SEBAL, avaliando os valores de forma pontual.

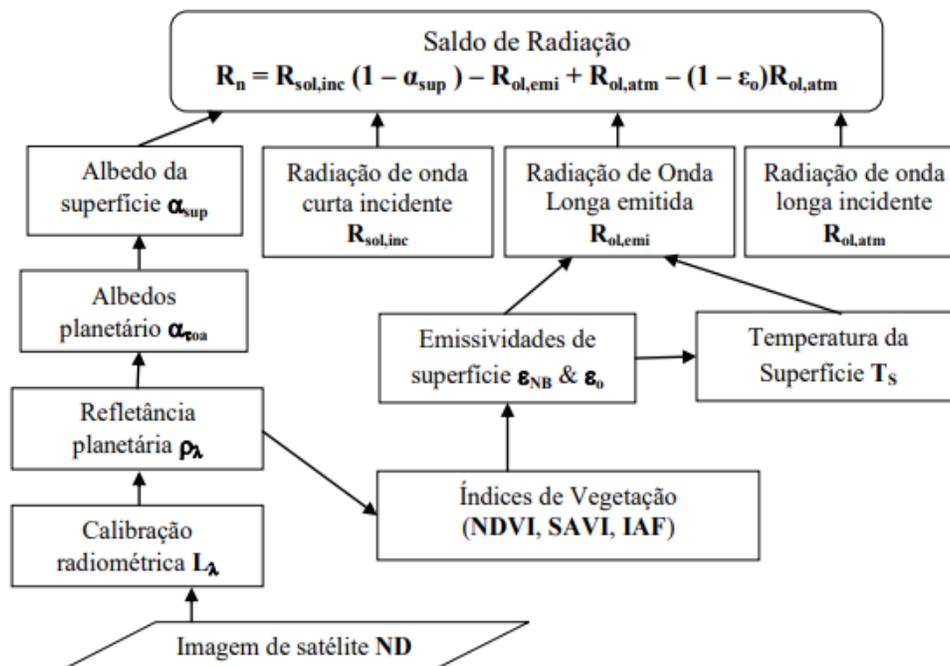
#### **4.5 Aplicação do algoritmo SEBAL**

Neste estudo, o SEBAL foi usado para estimar a Evapotranspiração real diária (ET<sub>r24h</sub>) do pomar de manga e das suas áreas adjacentes. Para isso, primeiramente foram estimados os componentes do balanço de energia para a obtenção do fluxo de calor latente (LE Wm<sup>-2</sup>) pela seguinte equação (BASTIAANSSEN et al., 1998):

$$LE = R_n - H - G$$

Onde: R<sub>n</sub> é o saldo de radiação (W m<sup>-2</sup>), H é o fluxo de calor sensível (W m<sup>-2</sup>) e G é o fluxo de calor no solo (W m<sup>-2</sup>). Dentre as componentes, o saldo de radiação foi o primeiro a ser obtido, seguindo uma sequência de etapas conforme descrito no fluxograma abaixo na Figura 10 (ALLEN et al., 2002)

Figura 10- Fluxograma metodológico para o cálculo do saldo de radiação instantâneo.



### Calibração Radiométrica

De posse das imagens, realizou-se a primeira fase do procedimento metodológico que foi a calibração radiométrica. Essa etapa consiste na conversão do número digital (ND) da imagem, representados pelos níveis de cinza de cada pix em radiância espectral monocromática ( $L_\lambda$ ), a qual que representa a energia solar refletida por cada pixel por unidade de área e tempo para cada comprimento de onda médio (CHANDER; MARKHAM; HELDER, 2009). As imagens do Landsat 8 foram adquiridas em formato de números digitais (ND), cujos os valores variaram de 0 a 65.535, com uma resolução radiométrica de 16 bits. Os coeficientes de calibração mínimos e máximos de radiância espectral foram obtidos nos arquivos de dados (MTL file) que acompanham as imagens (USGS, 2013), conforme a Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Coeficientes de calibração do OLI - Landsat 8 ab e bb, irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera – kb empregados na conversão da refletância monocromática em albedo e algumas características das bandas espectrais.

Bandas	Comprimento de Onda (µm)	Coeficientes de Calibração (Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> µm <sup>-1</sup> )		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera* (Wm <sup>-2</sup> µm <sup>-1</sup> )
		a	b	
1 OLI	0,43-0,45	-62,49131	756,73364	1627,3
2 OLI	0,45-0,51	-63,72469	771,66919	1812,5
3 OLI	0,53-0,59	-58,35032	706,58862	1932,1
4 OLI	0,64-0,67	-49,41915	598,43732	1579,9
5 OLI	0,85-0,88	-29,98809	363,13843	905,3
6 OLI	1,57-1,65	-7,55550	91,49276	242,6
7 OLI	2,11-2,29	-2,45779	29,76242	56,0
8 OLI	0,50-0,68 -	-55,66755	674,10181	-
9 OLI	1,36-1,38	-12,32335	149,22865	-
10 TIRS	10,60-11,19	0,10033	22,00180	-
11 TIRS	11.50-12.51	0,10033	22,00180	-

Fonte: USGS (2013) \* - Obtidos por Silva (2014) com base em dados MODTRAN

A primeira etapa para a calibração radiométrica foi calcular a radiância espectral no topo da atmosfera para as bandas 1 a 7, por meio da utilização da equação proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} * ND$$

Em que **a** e **b** são as radiâncias mínimas e máximas (Wm<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> µm<sup>-1</sup>), ND é a intensidade do pixel (número inteiro de 0 a 255), e i é o número da banda.

### Reflectância planetária

A segunda etapa consistiu na obtenção do cálculo da reflectância para as bandas refletivas (banda 1-7) aplicando-se a seguinte equação abaixo:

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi * L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} * \cos Z * d_r}$$

Onde  $L_{\lambda i}$  é a radiância espectral de cada banda;  $K_{\lambda i}$  é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ( $W^{-2} \mu m^{-1}$ );  $Z$  é o ângulo zenital solar (obtido no cabeçalho das imagens adquiridas) e  $d_r$  é a razão entre a distância média Terra-Sol ( $r_0$ ) e a distância Terra-Sol ( $r$ ) em um dado dia do ano (Dia Juliano, DJ), obtido pela seguinte equação abaixo (ALLEN et al., 2002).

$$d_r = 1 + 0,033 \cos(DOA \cdot 2\pi/365)$$

### Albedo planetário ( $\alpha_{toa}$ )

A terceira etapa foi calcular o albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ ) pela equação abaixo, utilizando os valores determinados por Ruhoof et al. (2015) para o Landsat 8.

$$\alpha_{toa} = 0,300\rho_2 + 0,276\rho_3 + 0,233\rho_4 + 0,143\rho_5 + 0,035\rho_6 + 0,012\rho_7$$

### Transmissividade atmosférica ( $\tau_{sw}$ )

A quarta etapa consiste em calcular a transmissividade ( $\tau_{sw}$ ), dada pela equação abaixo (ALLEN, et al, 2002)

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 * 10^{-5} * Z$$

onde  $Z$  é a altitude da área de estudo. Neste caso foi utilizada a altitude média para o município de Salinópolis, no valor de 10 metros.

### Albedo da superfície ( $\alpha$ )

Por fim, calculou-se o albedo da superfície ( $\alpha$ ) ou albedo corrigido das imagens, conforme a equação abaixo (ALLEN, et al, 2002).

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2}$$

em que:  $\alpha_{toa}$  representa o albedo no topo da atmosfera;  $\alpha_p$  é a radiação solar refletida pela atmosfera que varia de 0,025 a 0,04, mas para o SEBAL foi tomado o valor de 0,03, baseada em Bastiaanssen (2000), e  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica.

### Índices de vegetação

Os cálculos dos índices de vegetação foram computados utilizando a refletância monocromática, sendo calculado o seguinte índice:

#### NDVI

O Índice de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), proposto por Tucker (1979), descreve as condições da vegetação. E foi obtido através da razão entre a diferença das refletâncias do infravermelho e do vermelho e a soma das mesmas refletâncias, conforme a equação (ALLEN et al., 2002):

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v}$$

Onde:  $\rho_{iv}$  e  $\rho_v$  correspondem às bandas 5 e 4 do sensor OLI, respectivamente.

#### SAVI

Os efeitos de background do solo são amenizados através do cálculo do índice de vegetação SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index). Obtido através da equação proposta por Huete (1988).

$$SAVI = \frac{(1+L) * (\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)}$$

onde L é a constante 0,5.

#### IAF

O IAF (Índice de Área Foliar) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação, indicando a biomassa de cada pixel da imagem, sendo calculada pela seguinte equação empírica obtida por Allen et al. (2002):

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91}$$

### **Emissividades**

Em seguida foi calculada a Emissividade de Superfície ( $\epsilon_0$ ) através da equação de Plank invertida, proposta para um corpo negro. O cálculo de  $\epsilon_0$  é feito em função do IAF.

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 * IAF$$

### **Temperatura da Superfície (Ts)**

Para realizar o cálculo da temperatura da Superfície, foi realizado antes o computado da radiância monocromática utilizando a banda 10 do sensor Thermal Infrared Sensor (TIRS) LANDSAT-8. Empregando os fatores de reescalonamento da radiância fornecidos nos metadados (USGS, 2016):

$$L\lambda = MLQcal + AL$$

Onde:  $L\lambda$  é a radiância monocromática,  $ML$  é o fator de reescalonamento multiplicativo específico ( $3,342 \times 10^{-4}$ ),  $AL$  é o fator de reescalonamento aditivo específico (0,1), e  $Qcal$  é o valor pixel a pixel da imagem de satélite. Após o cálculo da emissividade e o cálculo da radiância espectral da banda termal, obteve-se a temperatura da superfície conforme equação abaixo:

$$Ts = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1\right)}$$

Onde: Onde  $K_1$  e  $K_2$  são constantes de calibração da banda termal do Landsat 8 – OLI e  $L\lambda$  é a radiância espectral da banda termal.

### **Radiação de Onda Longa Emitida (Rol,emi)**

Para o cálculo de radiação de onda longa emitida por cada pixel utilizou-se a equação de Stefan-Boltzmann, calculada em função da temperatura  $T_s$  e da emissividade da superfície  $\epsilon_0$ :

$$Rol, emi = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot Ts^4$$

Em que  $\sigma$  é a constante de Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ).

### **Radiação de Onda Curta Incidente ( $R_{s,inc}$ )**

A radiação de onda curta incidente é o fluxo de radiação solar direta mais a difusa que atinge a superfície terrestre em condições de céu claro (ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005; SILVA et al., 2011), e é dada pela seguinte Equação

$$R_{s,inc} = Q \cdot \cos.Z \cdot dr \cdot \tau_{sw}$$

Onde:  $Q$  é a constante solar ( $1367 \text{ W.m}^{-2}$ );  $\cos.Z$  é o cosseno do ângulo zenital solar;  $dr$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica.

### **Radiação de Onda Longa Incidente**

A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície, foi calculada em função da emissividade atmosférica do ar, conforme a equação de Stefan-Boltzmann, descrita abaixo (BASTIAANSSEN, 1995; ALLEN et al., 2002; BASTIAANSSEN et al., 2005).

$$R_{ol,atm} = \epsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_a^4$$

Em que:  $\epsilon$  é a emissividade atmosférica obtida por:  $0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,09}$  (ALLEN et al., 2002),  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ); e  $T_a$  é a temperatura do ar (K).

### **Saldo de radiação ( $R_n$ )**

Por fim, o saldo de radiação ( $\text{W.m}^{-2}$ ) à superfície ( $R_n$ ) determinado pixel a pixel, foi calculado conforme a equação descrita por Allen et al. (2002) partindo da radiância espectral dos dados orbitais:

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot R_s + R_{ol,atm} - R_{ol,emi} - (1 - \epsilon_0) \cdot R_{ol,atm}$$

Onde:  $\alpha$  é o albedo de superfície;  $R_s$  é a radiação de onda curta incidente;  $R_{ol,atm}$  é a radiação de onda longa incidente;  $R_{ol,emi}$  é a radiação de onda longa emitida e  $\epsilon_0$  é a emissividade de cada pixel.

### **Fluxo de calor no solo (G)**

A partir do saldo de radiação ( $R_n$ ) estimado, o fluxo de calor do solo ( $G$ ) ( $W\ m^{-2}$ ) foi calculado utilizando-se a seguinte equação proposta por Bastiaanssen (2000).

$$G = \left[ \frac{T_s}{\alpha_s} \cdot (0,0038 \cdot \alpha_s + 0,0074 \cdot \alpha_s^2) \cdot (1 - 0,98 \cdot NDVI^4) \right] \cdot R_n$$

Onde:  $T_s$  é a temperatura da superfície,  $\alpha_s$  é o albedo superficial, NDVI é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada e  $R_n$  é o saldo de radiação ( $W\ m^{-2}$ ). Para efeito de correção dos valores do fluxo de calor no solo para corpos d'água ( $NDVI < 0$ ), considerou-se o  $G$  como sendo metade do saldo de radiação ( $G/R_n=0,5$ ) (SILVA; BEZERRA, 2006).

### **Fluxo do calor sensível (H) e Fluxo de calor latente (LE)**

O fluxo do calor sensível ( $H$ ,  $W\ m^{-2}$ ) foi estimado a partir da velocidade do vento, temperatura da superfície, usando uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre dois níveis. O fluxo do calor sensível é representado pela equação aerodinâmica clássica citada abaixo (FARAH; BASTIAANSSEN, 2001) através de um procedimento iterativo (Figura 11). Vale ressaltar que nesta etapa utiliza-se dados da estação meteorológica no interior da cena estudada.

$$H = \frac{\rho \cdot c_p \cdot dT}{r_{ah}}$$

onde:  $\rho$  é a densidade do ar ( $kg\ m^{-3}$ )  $c_p$  o calor específico do ar,  $dT$  a diferença de temperatura próxima à superfície, e  $r_{ah}$  a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $s\ m^{-1}$ ). Para o cálculo do  $dT$  foram selecionados dois pixels âncora ("a" e "b) calculados entre as alturas 0,1 e 2,0 m. Esses foram selecionados em condições extremas resultando nos pixels "quente" e "frio" (BASTIAANSSEN et al., 1998; SUN., 2011), conforme a fórmula abaixo:

$$dT = a + b \cdot T_s$$

Para o cálculo de  $r_{ah}$  ( $s \cdot m^{-1}$ ) utilizou-se a velocidade do vento extrapolada para 200m acima da superfície do solo, sendo considerado inicialmente as condições de estabilidade neutra da atmosfera aplicando-se a seguinte equação:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* \cdot k}$$

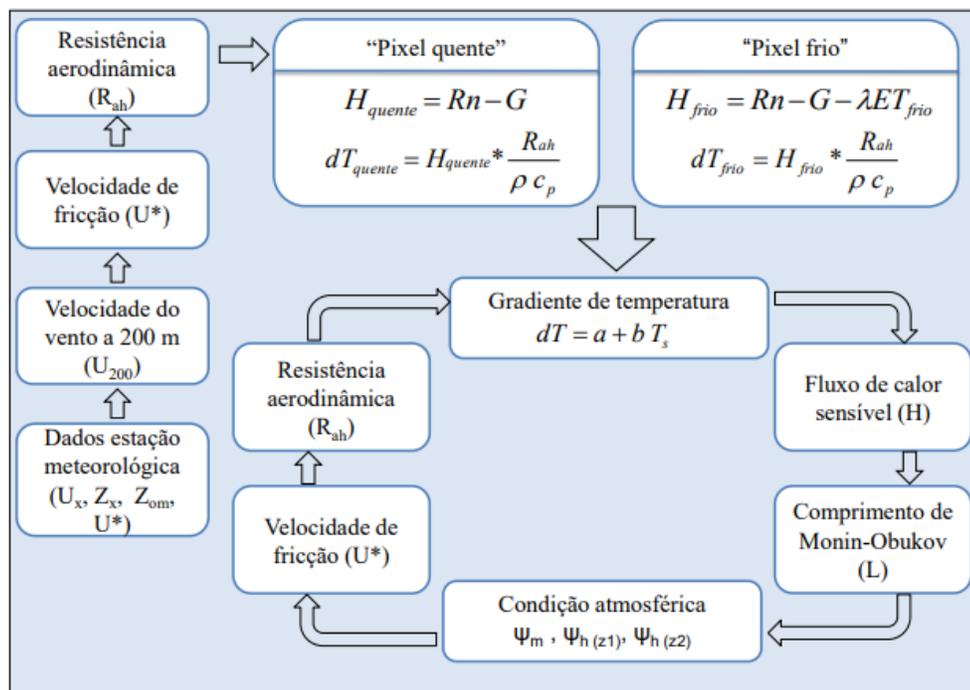
Onde:  $Z_1$  e  $Z_2$  representam as alturas acima da superfície (0,1 e 2,0 m);  $u^*$  é a velocidade de fricção ( $m \cdot s^{-1}$ ) e  $k$ , a constante de Von Karman (0,41).

Considerando os efeitos turbulentos que afetam as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, aplicou-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov ( $L$ ) nos valores iniciais de  $H$  obtido na etapa anterior, onde foi aplicada a seguinte equação:

$$L = \frac{\rho C_p u_* T_s}{kgH}$$

Em que,  $C_p$  é o calor específico do ar à pressão constante de  $1.004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\rho$  representa a densidade do ar ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $u^*$  é a velocidade de fricção em cada pixel da imagem ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $T_s$  é a temperatura da superfície (K) de cada pixel,  $k$  é a constante de Von Karman (0,41),  $g$  é aceleração da gravidade terrestre ( $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $H$  o fluxo de calor sensível ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), obtido inicialmente em cada pixel na etapa anterior.

Figura 11- Etapas para o processamento da estimativa do fluxo de calor sensível (H).



Fonte: Andrade e Hott (2018).

O valor de L está relacionado com o fluxo do calor sensível e define as condições de estabilidade atmosférica, sendo:  $L < 0$ , a atmosfera é considerada instável;  $L > 0$ , a atmosfera é considerada estável e se  $L = 0$ , a atmosfera é considerada neutra Bastiaanssen et al. (1998). Dependendo das condições atmosféricas, aplicou-se as formulações de Paulson (1970) e Webb (1970), aos valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum ( $\psi_m$ ) e de calor ( $\psi_h$ ). Mediante a esses resultados, os valores de  $u^*$  e  $r_{ah}$  foram corrigidos, sendo eles aplicados novamente na diferença de temperatura, repetindo-se os cálculos mencionados anteriormente conforme o fluxograma descrito na Figura 11. Após isso, calculou-se o fluxo de calor latente ( $LE \text{ Wm}^{-2}$ ) pela equação a seguir:

$$LE = R_n - G - H$$

### Evapotranspiração real diária (ET<sub>r24h</sub>)

Após a obtenção do LE foi calculada a ET<sub>r</sub> diária (ET<sub>r24h</sub>). Para isso calculou-se primeiramente a evaporação horária de evapotranspiração no momento do trânsito do satélite

(ET h), obtidas pela razão entre fluxo de calor latente, e o calor latente de vaporização da água, utilizando-se para conversão do valor instantâneo para valor horário, o valor de 3600 na multiplicação da razão, conforme a equação abaixo (ALLEN et al., 2002):

$$ET\ h = 3600 \frac{LE}{\lambda}$$

Dado que: ET horária é a evapotranspiração instantânea em mm/dia,  $\lambda$  é o calor latente do vapor em J/Kg, e a constante 3600 é o fator de conversão de tempo (ou seja, segundo em uma hora). O  $\lambda$  foi calculado usando a Eq. 6 (ALLEN et al. 2011):

$$\lambda = [2,501 - 0,00236 (T_s - 273)] \times 10^6$$

Os valores diários de evapotranspiração foram calculados usando as magnitudes da fração de evapotranspiração de referência horária, a qual foi calculada pelo método da FAO Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), com dados da estação meteorológica utilizada, conforme a equação a seguir:

$$FET_{0\_h} = \frac{ET_h}{ET_{0\_h}}$$

Considerando o valor da  $FET_{0\_h} = FET_{0\_24}$ , uma vez que o comportamento de  $FET_{0\_h}$  é relativamente constante em todo o período diurno (ALLEN et al., 2002). Logo, a ETr diária é dada pela Equação abaixo:

$$ETr = FET_{0\_h} \times ET_{0\_24}$$

Em que: ETr é a evapotranspiração real diária (mm dia<sup>-1</sup>);  $FET_{0\_h}$  é a fração de evapotranspiração real diária; e  $ET_{0\_24}$  é a evapotranspiração de referência diária, que representa a evapotranspiração cumulativa para o dia de imagem obtido pela adição dos valores horários para aquele dia.

Para a aplicação do modelo foram identificadas dificuldades de estimativa de evapotranspiração diária a partir de dados de evapotranspiração de referência, em virtude da escassez de dados meteorológicos para o cálculo da ETo, como

Vale ressaltar que ocorreram problemas no sistema de coleta de dados, resultando em dados faltosos de umidade relativa média do ar (%), fornecidos pela estação meteorológica. Conforme o boletim N°56 da FAO (FAO56) para possíveis ausências de elementos climáticos, como velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa na estimativa da evapotranspiração, é proposto por Allen et al. (1998) dois procedimentos, sendo o primeiro deles, o método de Penman-Monteith (FAO 56) com dados estimados de velocidade do vento, umidade relativa e radiação. O segundo procedimento é o método de Hargreaves-Samani. Para esse estudo adotou-se o método de Penman-Monteith (FAO 56) (ALENCAR; SEDIYAMA; MANTOVANI, 2015).

#### 4.4 Evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith FAO-56

A partir dos dados da estação meteorológica, foi determinado a Evapotranspiração de referência diária ( $ET_0$  24h, mm dia<sup>-1</sup>) por meio da utilização do modelo físico de Penman-Monteith da FAO-56 (ALLEN et al., 1998), conforme a equação abaixo:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

$ET_0$  - evapotranspiração de referência (mm d-1);

$R_n$  - saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m-2d-1);

$G$  - Densidade do fluxo de calor do solo (MJ m-2 d-1);

$T$  - Temperatura do ar a 2 m de altura (°C);

$u_2$  - velocidade de vento a 2 m de altura (m s-1);

$e_s$  - pressão de vapor de saturação (kPa);

$e_a$  - pressão parcial de vapor (kPa);

$\Delta$  - declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C-1), e

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico (kPa °C-1)

#### 4.5 Evapotranspiração pela Razão de Bowen

No Balanço de Energia pela Razão de Bowen a razão entre os fluxos de calor sensível (H) e de calor latente (LE) é definida como Razão de Bowen ( $\beta$ ) (PEREIRA et al., 2021). Essa razão é obtida através da relação de transporte vertical de calor e vapor d'água, ao considerar que há igualdade nos coeficientes de transporte turbulento do fluxo de calor sensível e vapor d'água, KH e KW, respectivamente tem-se a seguinte equação (ARIA, 2001).

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}$$

$\beta$  - Razão de Bowen (adimensional)

$\Delta T$ - Diferença de temperatura do ar entre os níveis 1 e 2 (°C);

$\Delta e$ - Diferença da pressão real de vapor do ar entre os níveis 1 e 2 (kPa);

$\gamma$  - Coeficiente psicrométrico (kPa).

Para estimativa do fluxo de calor latente (LE) aplicou-se a seguinte equação:

$$LE = \frac{Rn-G}{(1-\beta)}$$

Em que: LE é o fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ); Rn é o saldo de radiação ( $W m^{-2}$ ); e G é o fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ). Para a estimativa da evapotranspiração real foi aplicado a seguinte equação abaixo, sendo considerado o tempo de 20min para cada valor gerado, os quais foram somados até a determinação diária da  $ETR_{RB}$ :

$$ETR_{RB} = \frac{LE \times 1200}{\lambda}$$

Em que  $ETR_{RB}$  é a evapotranspiração real diária obtida pelo método da razão de Bowen ( $mm h^{-1}$ ); 1200 é o tempo correspondente em segundos;  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água ( $J kg^{-1}$ ).

#### 4.6 Análise estatística

A validação dos valores da ETr estimados pela aplicação do algoritmo SEBAL foi executada mediante análise comparativa simples entre esses valores e os estimados pelo método de Penman-Monteith, padrão da FAO 56 (ALLEN et al. (1998) e pelo método da Razão de Bowen (PEREIRA et al., 2021). A análise comparativa foi realizada pelo erro absoluto (EA), erro relativo (ER) e erro quadrático (EQ) conforme as equações abaixo (BEZERRA; BEZERRA; RÊGO, 2021).

##### Análise de erros entre ETr Sebal e Método de Penman-Monteith

$$EA = | ETr (Penman Monteith) - ETr (SEBAL) |$$

$$ER = \frac{|ETr (Penman Monteith) - ETr(SEBAL)|}{ETr(Penman Monteith)} \cdot 100$$

$$EQ = | ETr (Penman Monteith) - ETr (SEBAL) |^2$$

##### Análise de erros entre ETr Sebal e Método de Razão de Bowen

$$EA = | ETr (Razão de Bowen) - ETr (SEBAL) |$$

$$ER = \frac{|ETr (Razão de Bowen) - ETr(SEBAL)|}{ETr(Razão de Bowen)} \cdot 100$$

$$EQ = | ETr (Razão de Bowen) - ETr (SEBAL) |^2$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Variação dos parâmetros biofísicos e das variáveis climatológica

Os valores dos parâmetros obtidos pelo algoritmo SEBAL para a área de estudo (pomar de manga e áreas circunvizinhas) são apresentados na Tabela 04 e nas imagens a seguir, conforme os períodos dos dias juliano 02/08/2015 (214DJ), 06/07/2017 (187DJ) e 02/08/2021 (214DJ).

De acordo com a Tabela 4, os maiores valores médios dos parâmetros biofísicos foram registrados na imagem 02/08/2021, exceto a temperatura do ar e a evapotranspiração que foi mais elevada na imagem de 02/08/2015. Observa-se também, nessa tabela, uma grande amplitude nos dados do NDVI, do calor sensível (H) e do calor latente (LE), sendo a imagem 02/08/2021, a que apresentou maior frequência de ocorrência. Esse fato pode estar associado ao comportamento dos elementos meteorológicos, principalmente em relação à precipitação, onde maiores valores de precipitação pluviométrica tendem a resultar em maiores valores de índices de vegetação (MEDEIROS et al., 2022).

Tabela 4- Parâmetros biofísicos estimados pelo algoritmo SEBAL para a área de estudo, Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA.

DAS	Imagem (Data)		NDVI	Albedo	TS °C	Rn (W/m <sup>2</sup> )	H (W/m <sup>2</sup> )	LE (W/m <sup>2</sup> )	ET24 (mm/dia)
214	02/08/2015	Máx.	0,465	0,24	27,84	483,42	201,35	389,69	5,8
		Mín.	0,069	0,05	24,24	368,4	44,31	119,4	3,81
		<b>Med</b>	<b>0,267</b>	<b>0,14</b>	<b>26,04</b>	<b>425,91</b>	<b>122,83</b>	<b>254,54</b>	<b>4,805</b>
187	06/07/2017	Máx.	0,49	0,22	24,19	533,30	190,89	393,04	5,3
		Mín.	0,13	0,07	22,11	443,13	101,75	195,37	2,87
		<b>Med</b>	<b>0,31</b>	<b>0,14</b>	<b>23,15</b>	<b>488,215</b>	<b>146,32</b>	<b>294,20</b>	<b>4,085</b>
214	02/08/2021	Máx.	0,548	0,23	25,67	773,43	360,52	566,68	4,6
		Mín.	0,181	0,08	23,85	634,01	148,89	221,57	2,02
		<b>Med</b>	<b>0,3645</b>	<b>0,15</b>	<b>24,76</b>	<b>703,72</b>	<b>254,70</b>	<b>394,12</b>	<b>3,31</b>

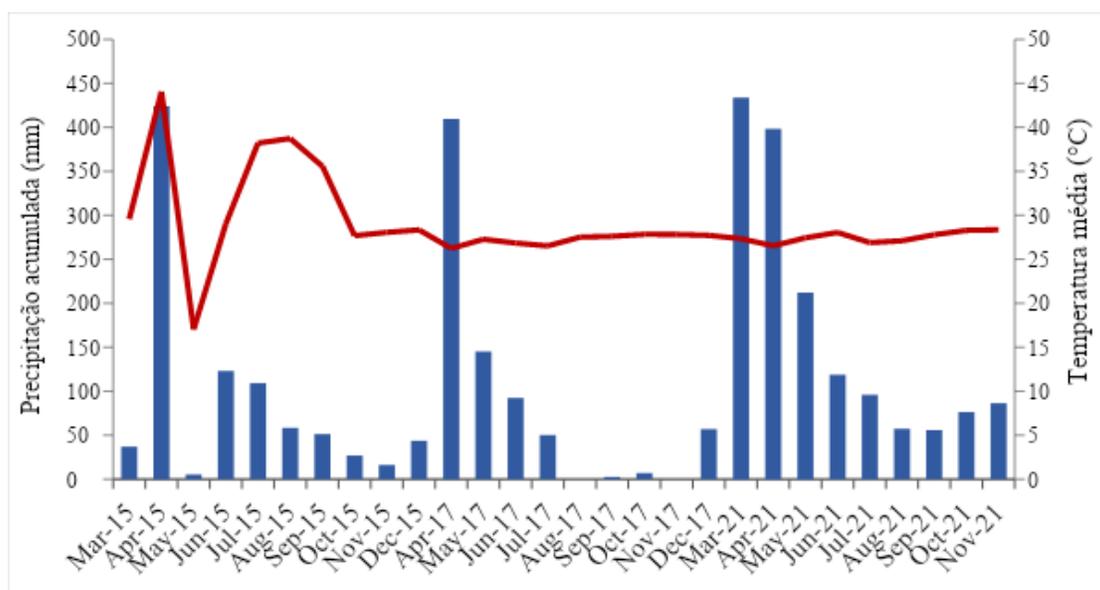
Fonte: Da Autora.

Ao analisar a distribuição pluviométrica e a temperatura atmosférica da área de estudo para o período selecionado, observou-se que os primeiros meses do ano são os mais chuvosos, sendo os meses de março e abril os com maiores valores de precipitação pluviométrica (Figura 12). O ano de 2015 apresentou maiores variações na temperatura e

precipitação, ocasionadas provavelmente pelo fenômeno do El Niño. Para esse período é possível notar que o valor máximo pluviométrico foi de 424,2 mm no mês de abril, e a pluviometria acumulada para esse ano atingiu um valor de 895,55 mm.ano<sup>-1</sup>. Para o ano de 2017, o mês de abril também foi o que teve maior valor de precipitação, sendo obtido o valor de 409,4mm para esse mês e o acumulado de 763,8mm para esse ano.

Já no ano de 2021 os índices de precipitação (expresso em colunas) foram bem ocorrentes, sendo os meses iniciais (março a julho) os que apresentaram maior quantidade de chuvas, tendo valor máximo de 433,60mm para o mês de março e precipitação acumulada de 1.534,84 mm.ano-1. A temperatura média (expressa pela linha) encontrada para o período estudado variou de 26,52°C a 28,35°C. Vale ressaltar que ocorreu falha no sistema de coleta dos dados para os meses analisados de março-2017 e dezembro-2021, resultando em dados faltosos.

Figura 12- Variação mensal da precipitação acumulada e temperatura média para o ano de 2021, no Sítio Experimental de Cuiarana. Salinópolis-PA.



Fonte: Da Autora.

Resultados semelhantes de precipitação foram observados por Silva et al. (2018) na Vila de Cuiarana, sendo encontrado o valor de 631mm, em fevereiro de 2014, onde o período chuvoso compreendeu os meses de janeiro a maio. A área de estudo pertence à mesorregião Nordeste Paraense e à microrregião Salgado, a qual possui um volume de chuva expressivo

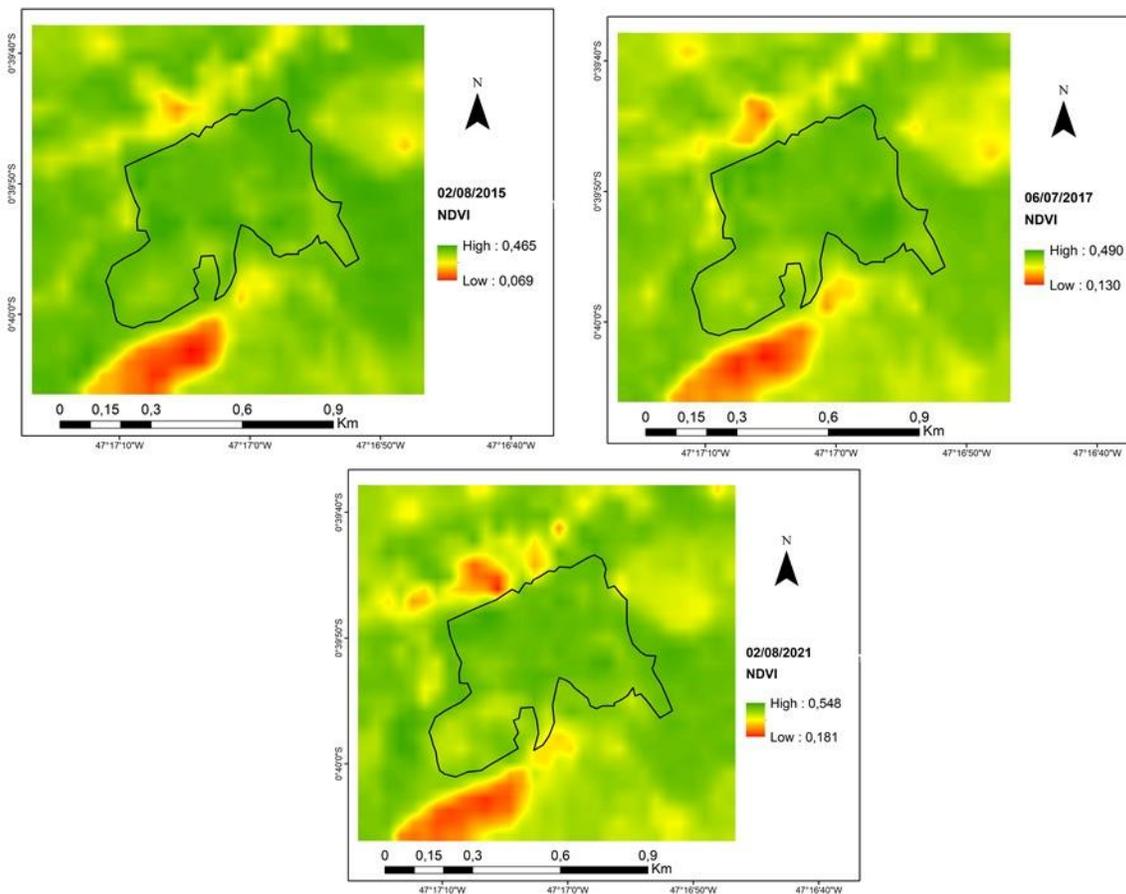
em relação a outras regiões ao longo do ano, fato que está diretamente relacionado a sua localização geográfica, possuindo em média uma precipitação anual de 1.750 a 2.500 mm, e até maior que 3000mm. É uma região que se caracteriza por apresentar períodos chuvosos de 7 a 8 meses (ANDRADE et al., 2017). A Zona de Convergência Intertropical (ZIT), as linhas de instabilidade e a ocorrência de fenômenos como o El Niño – Oscilação Sul (ENOS) e La Niña são considerados os principais fatores responsáveis pela modulação do regime de chuva na região do Nordeste Paraense. Sendo o El Niño o que tem efeito inverso no regime de chuvas, reduzindo sua incidência em estações chuvosas (SANTOS; VITORINO; PIMENTEL, 2017; ANDRADE et al., 2017). Já as temperaturas elevadas encontradas na região do nordeste paraense decorrem em função da influência da massa de ar tropical marítima e equatorial (ANDRADE et al., 2017).

## **5.2 Distribuição espaço temporal dos parâmetros biofísicos**

Na Figura 13 é apresentada a variabilidade espacial do índice de vegetação NDVI para os períodos estudados, onde o período de 2015 foi o ano que apresentou os menores índices de NDVI (0,465-0,069), ano esse em que o evento climático El Niño foi mais intenso no verão amazônico, já o período de 2021 foi o qual apresentou os valores mais altos de NDVI (0,548-0,181). As áreas de superfícies que apresentaram valores de NDVI mais altos correspondem a área coberta com o pomar de manga e vegetação de mangue, indicadas pelas tonalidades em verde, já as áreas com valores baixos correspondem a solo exposto como a área em expansão urbana e de feição de apicum, indicadas pelas tonalidades em amarelo-avermelhado na imagem.

Ao considerar o intervalo de tempo das três imagens, observa-se que os efeitos da anomalia climática ainda podem ser visualizados para os anos de 2017 e 2021, que apesar do período de 2021 ter sido um ano com precipitação acumulada de 1.534,84 mm, em comparação com o de 2015 que foi de 895,55mm, ainda assim os valores obtidos do NDVI para a área refletem uma vegetação com característica de estresse hídrico, podendo ter sido causada por eventos naturais ou pela ação antrópica, como a prática de podas.

Figura 13- Distribuição espacial do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA.



Fonte: Da Autora.

A anomalia climática do El Niño que submeteu a floresta da Amazônia a enfrentar temperaturas muito elevadas e grave seca durante o evento, pode ter ocasionado estresse hídrico em muitas espécies vegetais pelo déficit hídrico, afetando a qualidade fotossintética do vegetal e consequentemente o potencial de reflectância das folhas (GONÇALVES; BLANCO, 2020; MARENGO; SOUZA, 2018). Resultados obtidos por Pismel et al. (2016) no Estado do Pará, indicam que os baixos valores de NDVI em áreas com plantios florestais estão associados ao período de maior deficiência hídrica do solo, o que influencia na queda de folhas das espécies, refletindo na superfície imageada que responde com valores mais elevados no solo do que na vegetação.

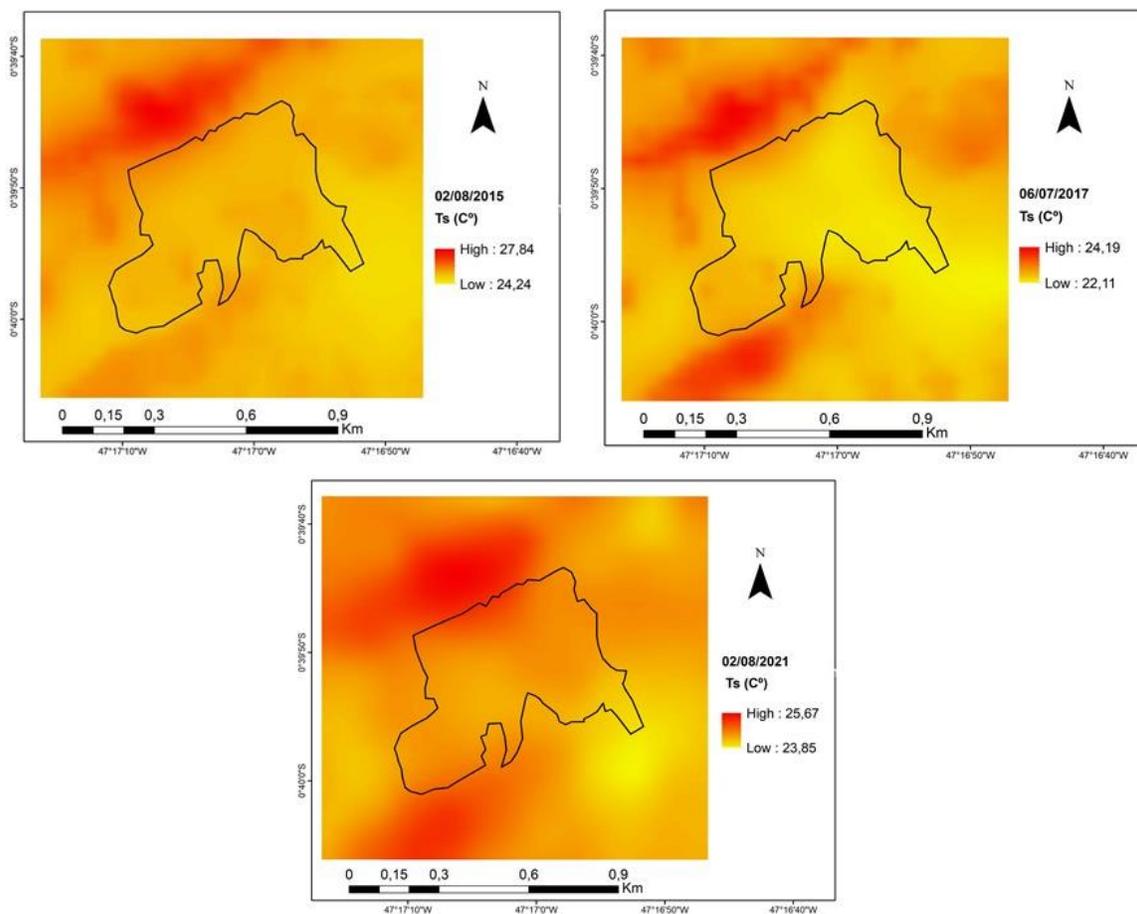
Por sua vez, no estudo de Sousa, Souza e Vitorino (2011) em área de pomar de manga no município de Salinópolis-PA, foi identificado a correlação do NDVI às diferentes fases do ciclo fenológico da manga, onde os menores valores do índice coincidem com o período de florescimento e de maturação da espécie, alterando a coloração do dossel para tons mais claros, em contrapartida o ganho de biomassa no período da frutificação aumenta os valores do NDVI. Já os valores menores de NDVI para os manguezais pode ser explicado pelo caráter semi-denso da vegetação e pela grande ocorrência de solo lamoso, o que contribui para um valor inferior de NDVI (KRIZEK; SANTOS, 2021).

Conforme Leite, Santos e Santos (2017), o comportamento espectral da vegetação pode sofrer alterações ao longo do tempo, em consequência dos eventos naturais como alterações sazonais, estágio fenológico, mudanças climáticas, assim como modificações impostas por ações antrópicas.

O NDVI mostra-se como um bom estimador para avaliar a expansão do crescimento urbano em áreas naturais, uma vez que ele é sensível às variações na estrutura da vegetação, ocasionados principalmente por estresse hídrico que comprometem a atividade fotossintética das plantas em períodos de baixa oferta pluvial (ARAÚJO et al., 2019). Por meio dele é possível compreender os diversos processos biofísicos como a transpiração vegetal e a distribuição espacial dos fluxos superficiais de um ecossistema, os quais estão relacionados a estrutura física do dossel e ao fluxo de biomassa do meio, sendo responsáveis pelo equilíbrio da quantidade de radiação no interior do dossel e na troca de energia e gás carbônico com a atmosfera (ATAIDE; OLIVEIRA; PINTO, 2020).

Na Figura 14 verifica-se a variação temporal da distribuição espacial da temperatura de superfície (TS) para o período estudado, onde os valores variaram de 22,11°C a 27,84°C, sendo o ano de 2015 o que teve maior temperatura e o ano de 2017 o que teve menor temperatura. Pode-se notar que a área em expansão urbana e de feição de Apicum foram as que tiveram as maiores temperaturas quando se compara com as áreas do manguezal e do pomar de manga. Os menores valores de temperatura estão destacados pela tonalidade amarela e os maiores valores pela tonalidade avermelhada.

Figura 14- Distribuição espacial da Temperatura de superfície ( $T_s$ °C) nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA.



Fonte: Da Autora.

Observa-se que no dia 02/08/2015 as temperaturas foram mais elevadas em relação aos outros períodos estudados, onde o valor mínimo ( $24,24^{\circ}\text{C}$ ) desse período foi superior ao valor máximo ( $24,19^{\circ}\text{C}$ ) do dia 06/07/2017. Essa diferença pode ser atribuída à baixa umidade no solo e presença de vapor d'água na atmosfera ocasionado pelo fenômeno do El Niño no ano de 2015, o que afeta a manutenção da massa foliar das espécies e maior exposição do solo a radiação solar. Por sua vez, no dia 02/08/2021 as temperaturas foram superiores ao ano de 2017, onde a imagem mostra o avanço do calor térmico da área urbanizada e de apicum, sendo reduzido parcialmente pela cobertura do pomar de manga e vegetação de mangue.

Assim, pressupõe-se que as áreas com maiores temperaturas estão associadas a presença de edificações e diminuição de áreas com vegetação. Conforme Giordano e Krüger (2018), a temperatura da superfície é resultante tanto da energia incidente como do albedo, onde superfícies mais claras tendem a refletir mais a radiação incidente, sendo convertida uma menor parcela de energia em calor, o que resulta em temperaturas superficiais menores.

Além da área urbana, a área com feições de Apicum também apresentou maiores temperaturas quando comparado com a área de pomar e manguezal, podendo esse resultado ser atribuído às características físico-químicas da sua superfície, que refletem características de solo exposto. Segundo Araújo et al. (2020), o Apicum é considerado um ambiente de transição entre os sedimentos de encostas e os sedimentos de manguezais, sendo constituído por uma área arenosa com elevada salinidade e desprovido de vegetação, comumente encontrado em áreas de borda interna do manguezal. A área de mangue encontra-se em processo de regeneração conforme o estudo de Fernandes et al. (2018), o que favorece a cobertura do solo e diminui a temperatura da superfície.

A ocorrência dos maiores valores de temperatura superficial ser na área em expansão urbana podem está relacionado ao evento de ilha de calor, uma vez que nessas áreas há uma maior retenção da radiação solar pelos materiais construtivos, o que altera o microclima local e intensifica o calor urbano (GIORDANO; KRÜGER, 2018). Bezerra et al. (2018) ao estudarem a relação da temperatura de superfície com o índice de vegetação no município de Belém-PA concluíram que áreas com maior ausência de vegetação, ocasiona desconforto térmico para a população, o que evidencia a importância da vegetação na amenização da temperatura em uma determinada área. Esses autores ressaltaram também que informações como essas obtidas por sensoriamento remoto podem ser uma excelente ferramenta na tomada de decisão no monitoramento da qualidade ambiental e do planejamento urbano da região.

Conforme Marengo e Souza Jr. (2018), as alterações climáticas ocasionadas pela mudança no uso da terra e consequentemente na elevação de temperatura afeta de maneira conjunta as condições ambientais e sociais de uma região, o que inclui impactos na segurança hídrica, alimentar, energética e socioambiental. Uma vez que a floresta contribui na chuva local e regional participando do ciclo hidrológico e transporte de umidade dentro e fora da região. Para Santos et al. (2021), alguns municípios Costeiros no Estado do Pará apresentam

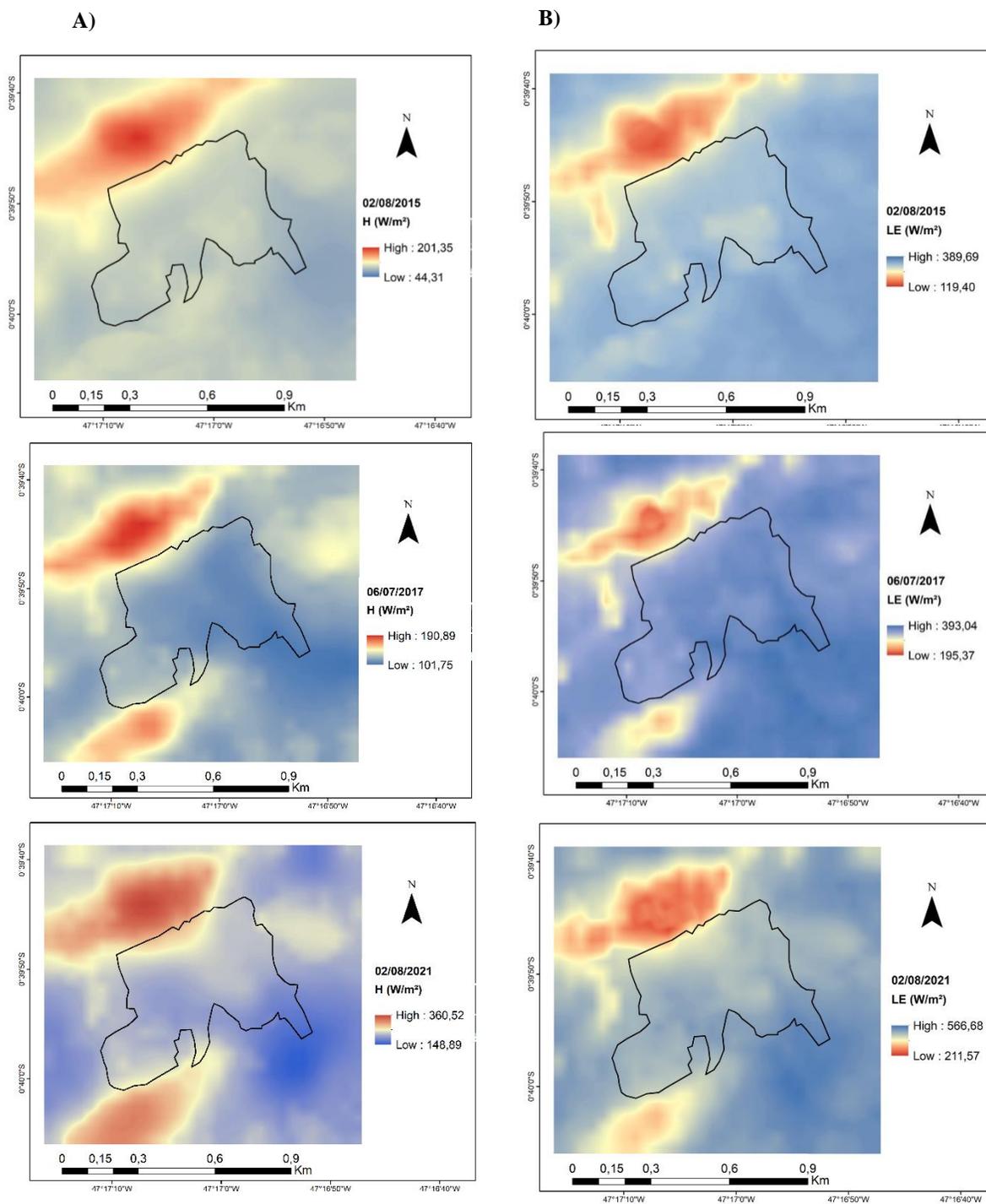
vulnerabilidade Socioambiental às Mudanças Climáticas, uma vez que os cenários climáticos de anomalias de precipitação e temperatura apontaram que as mudanças do clima serão um aporte para intensificar a vulnerabilidade local, onde a população ainda não está preparada devendo haver fortalecimento nas políticas públicas para o enfrentamento das mudanças climáticas.

Uma das medidas para o combate às ilhas de calor é o plantio de árvores nas áreas urbanas. No estudo de Ribeiro et al. (2018) foi analisado a influência do sombreamento arbóreo nos índices de conforto térmico na cidade de Cuiabá – MT, onde a Mangueira (*Mangifera indica*) juntamente com a espécie *Licania tomentosa* contribuíram de maneira satisfatória no resfriamento evaporativo, umidificação, melhoramento do microclima interno e no seu entorno, principalmente em região com temperatura elevadas. Além de proporcionar conforto térmico, essa espécie apresenta uma grande importância socioambiental, estando presente em muitos quintais agroflorestais na Amazônia, favorecendo a melhoria do solo e a segurança alimentar de muitas famílias (ALMEIDA; GAMA, 2014).

Na Figura 15 é apresentado a distribuição espaço temporal das estimativas do calor sensível (H) e latente (LE). As maiores variações do calor sensível foram verificadas no ano de 2021, com mínima de 148,89 e máxima de 360,52 W.m<sup>-2</sup>. Para esse mesmo ano, foi observado também os maiores valores do calor latente, com mínima de 211, 57W.m<sup>-2</sup> e máxima de 566,68 W.m<sup>-2</sup>.

Observa-se que o fluxo do calor latente e sensível está relacionado às condições hídricas do ambiente, onde os menores valores do calor sensível estão associados às feições com cobertura vegetal e corpos hídricos, representados pela tonalidade em azul. Por outro lado, os maiores valores correspondem aos ambientes com maior exposição do solo e mais antropizados como a área em expansão urbana e a feição de apicum, destacados pela tonalidade em vermelho. Nota-se também que os valores do fluxo de calor latente foram maiores que os de fluxo de calor sensível em todos os períodos avaliados.

Figura 15- Distribuição espacial do Calor Sensível (A) e Calor Latente (B) nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA.



Fonte: Da Autora.

Dentre os períodos estudados, 2021 teve o primeiro semestre chuvoso o que favoreceu a disponibilidade hídrica no ambiente, permitindo a utilização da energia disponível do saldo de radiação para os processos de evapotranspiração da vegetação no ambiente. Contudo, apesar do ano de 2015 ter acontecido o fenômeno climático El Niño, caracterizado pelo aquecimento das águas do Oceano pacífico, o período seco de 2021, especificamente no mês de agosto, favoreceu o aumento no fluxo do calor sensível por meio do aquecimento do solo nas áreas de feição de Apicum e da expansão urbana, que de maneira direta influenciou no aquecimento da camada de ar adjacente do ambiente, diminuindo o fluxo de calor latente nessas áreas.

Esses resultados estão em consonância com Souza et al. (2018b) na mesma área e cultura objeto de estudo, onde o período chuvoso favoreceu o maior consumo de energia na forma de LE. Contudo em épocas com intensa quantidade de chuvas e nebulosidade o consumo de LE é reduzido, porém ainda é maior que o H, devido à baixa quantidade de energia solar fornecida para o sistema. Vale ressaltar que no ano de 2015/2016 a região da Amazônia sofreu forte efeito do El Niño, caracterizado pelo aquecimento anômalo das águas superficiais do oceano Pacífico Tropical central e leste que ocasionaram o enfraquecimento da atividade convectiva das águas levando a déficits de precipitação na região. Na Amazônia Central, região de Santarém-PA, houve redução em torno de 50% na precipitação pluvial no período chuvoso e no período menos chuvoso, com ausência de precipitação nos meses de outubro e novembro (OLIVEIRA et al., 2020).

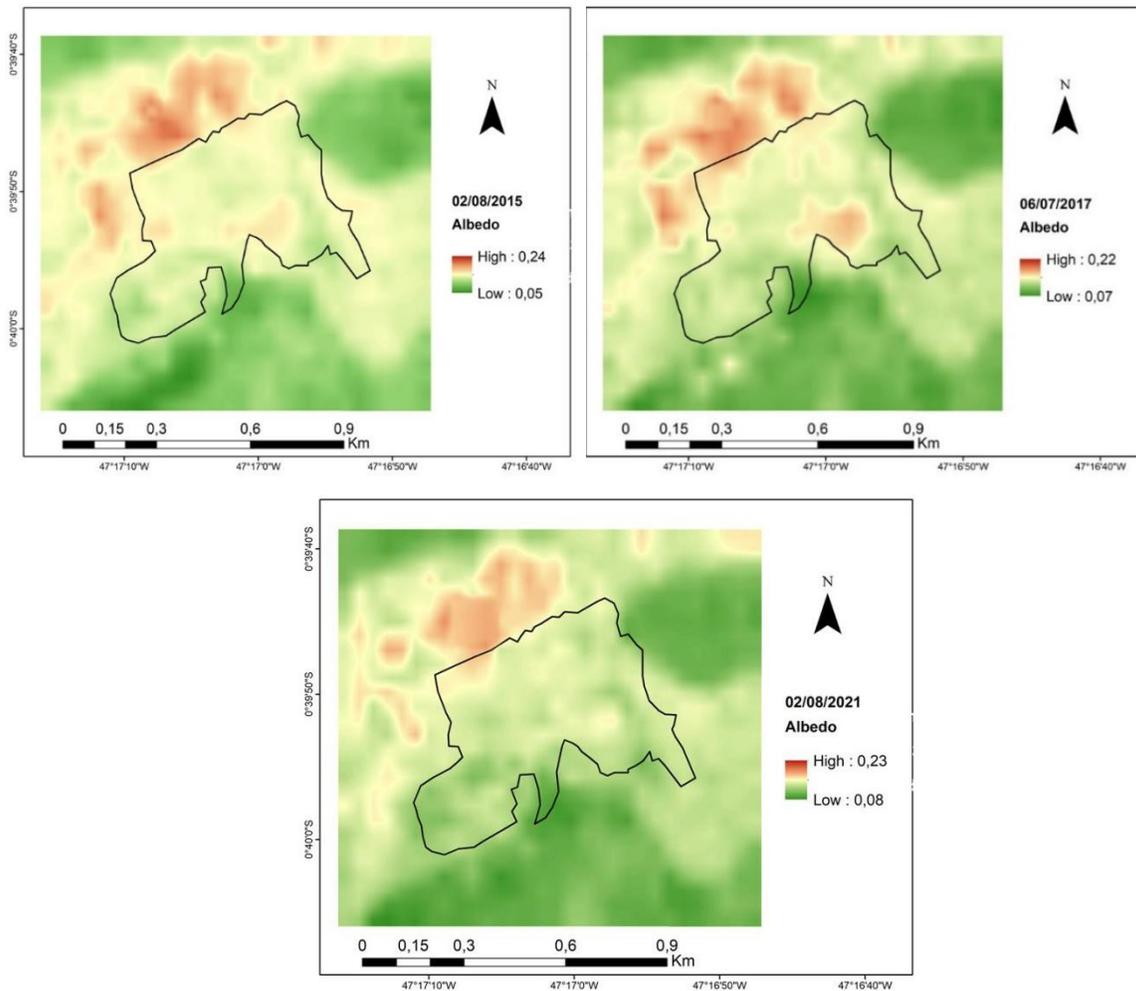
O fluxo de calor sensível é um dos componentes do balanço de energia, responsável pelo aquecimento do ar, sendo resultante da diferença de temperatura entre a superfície e o ar próximo a ela por meio da transferência de calor por condução e convecção, ele provoca apenas variação de temperatura (DANTAS et al., 2011). Em áreas com baixo índice de vegetação, maior é a quantidade de energia disponível para ser convertida em fluxo de calor sensível, sendo influenciado pelo dossel da vegetação (MORENO et al., 2021). Conforme Gomes et al. (2015), a diminuição da cobertura vegetal tende a alterar os aspectos microclimáticos locais, deixando a atmosfera mais seca e quente, principalmente em períodos mais secos, o que resulta em porcentagens elevadas do calor sensível quando comparado com o período mais úmido.

O fluxo de calor latente, por sua vez, é responsável pela evapotranspiração da água no ambiente, sendo dependente da umidade do ar para seu processo (MOREIRA et al., 2017). De acordo com Ataíde et al. (2020), em épocas de períodos secos uma floresta funciona como uma verdadeira bomba d'água para a atmosfera por meio do fluxo do calor latente, a fim de equilibrar o intenso aquecimento da superfície por radiação, sendo este vapor de água liberado uma das principais fontes de umidade para a precipitação local.

Na Figura 16 verifica-se a variação temporal da distribuição espacial do albedo de superfície, onde todos os períodos apresentaram comportamento similar quanto a variação do albedo, sendo obtidos valores máximos de 0,24 e mínimos de 0,05 no ano de 2015. Os valores mais elevados do albedo foram registrados na área em expansão urbana e no pomar de manga, sendo representados pela tonalidade bege-vermelho. E os menores valores foram registrados em locais contendo água ou influência da mesma, como as áreas de vegetação de mangue e as áreas de Apicum, sendo representados no mapa pela tonalidade verde.

Observa-se também que os valores de albedo de superfície encontrados para as cenas em estudo apresentam baixa variabilidade temporal, estando associadas às diferentes coberturas do solo, enquanto que as mudanças temporais podem ter sido afetadas pelas condições climáticas como o fenômeno El Niño em 2015/2016, razão esta que pode ter influenciado a ocorrência dos valores máximos e mínimos na cena de 2015, onde a menor ocorrência de chuvas na região pode ter reduzido a quantidade de água no solo, influenciando o comportamento da vegetação e expondo o solo, aumentando o seu potencial de reflectância. Observa-se que a área do pomar de manga e parte do manguezal apresentaram uma coloração clara, ocasionado possivelmente pelo espaçamento entre as mangueiras e pelo processo de regeneração das espécies de mangue no local, o que permitiu uma maior reflectância do solo.

Figura 16- Distribuição espacial do albedo de superfície nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA.



Fonte: Da Autora.

Campos, Adami e Araújo (2021), apontam o fenômeno El niño como uma das principais causas no aumento dos valores do albedo em áreas de floresta, vegetação secundária e pastagem, uma vez que esse fenômeno favorece o estresse fisiológico do vegetal em resposta ao estresse hídrico prolongado, o que acelera a taxa de degradação da clorofila, estimulando a desidratação das folhas, e como consequência a ocorrência do aumento de refletância. No estudo de Santos et al. (2014), às áreas de floresta por apresentarem vegetação mais escura e mais alta (em média 30 metros), acarretou menor refletividade de energia, diferente da área de pastagem, por ser caracterizada por solo exposto, vegetação gramínea e arbustiva, possuem maior tendência de reflexão. Em área de mangue e apicum, a coloração

escura do solo resultante da decomposição da matéria orgânica reflete menos a radiação incidente no solo, o que acarreta em menor valor de albedo (QUERINO et al., 2013).

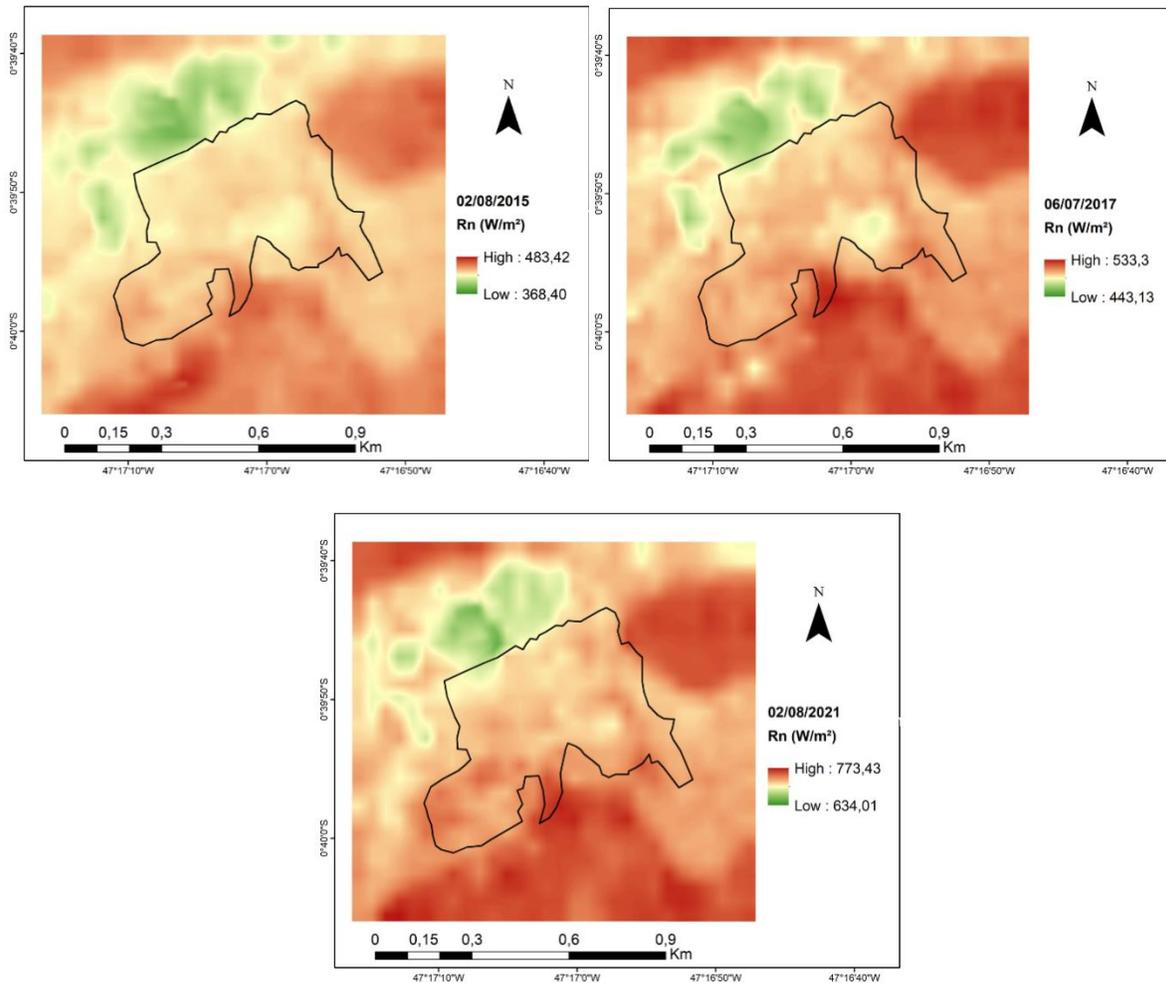
Segundo Ataíde et al. (2020), em dias chuvosos os valores de albedo tendem a diminuir, em virtude da maior absorção da radiação solar pela superfície do dossel vegetativo, o qual está diretamente relacionado com o índice de área foliar.

A variação espaço temporal do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) está representada na Figura 17, sendo o valor máximo registrado no período de 02/08/2021 (634,01 a 773,43  $W.m^{-2}$ ) e o mínimo no período de 02/08/2015 (368,40-483,42  $W.m^{-2}$ ). Ao analisar as imagens, verifica-se que o saldo de radiação teve uma tendência crescente do período de 2015 para 2021, onde os maiores valores de  $R_n$  (tons avermelhados) foram detectados em áreas com presença de vegetação e recurso hídrico, como as áreas do pomar de manga, manguezal e apicum. Já os menores valores de  $R_n$  (tons verdes) foram registrados na área em expansão urbana.

Esses resultados expõem o quanto de energia radiante está disponível na superfície, mediante os fluxos de entrada e saída, sendo os maiores valores encontrados em áreas com vegetação e superfícies com água, onde as temperaturas de superfície e o albedo foram menores, resultando em maior quantidade de energia disponível para os processos físicos e biológicos na superfície (GOMES et al., 2017). Segundo Ataíde et al. (2020), um dos fatores responsáveis pela diminuição nos valores do saldo de radiação é o aumento de radiação difusa causado pela alta incidência de nebulosidade na bacia amazônica. Por outro lado, a menor presença de nuvens aumenta a quantidade de energia líquida disponível para realização dos mais diversos processos que ocorrem na interface superfície-atmosfera.

No estudo de Moreira, Nóbrega e Silva (2011), os menores valores encontrados foram na área urbana, onde há predomínio de superfícies impermeabilizadas com concreto, fazendo com que haja uma alta refletividade de radiação de onda longa emitida, por outro lado os maiores valores foram encontrados nas áreas com vegetação e corpos hídricos, em virtude da alta absorção de radiação de onda curta incidente e a baixa refletividade. Debastiani et al. (2018), ao utilizarem a metodologia do SEBAL em conjunto com a imagem do satélite Landsat 8, registraram também os maiores valores do saldo de radiação nas classes de água e floresta, enquanto os menores valores foram obtidos em locais de solo exposto e agricultura, o que corrobora com os resultados desta pesquisa.

Figura 17- Distribuição espacial do Saldo de Radiação de superfície nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA.

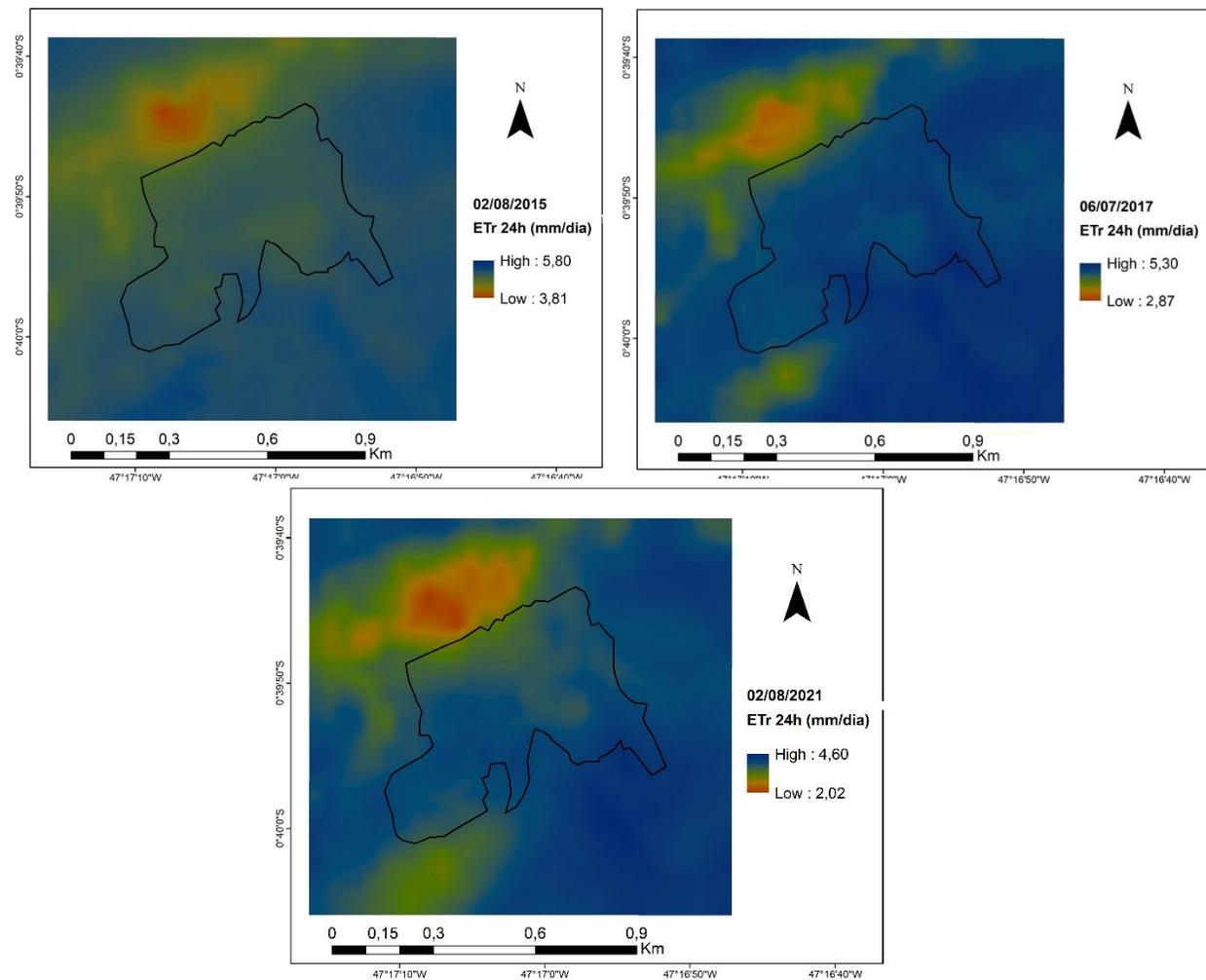


Fonte: Da Autora.

A variabilidade da dinâmica espaço-temporal da evapotranspiração diária ( $ET_{24h}$ ) estimada mediante o algoritmo SEBAL está representada na Figura 18, onde o valor máximo registrado foi no período de 02/08/2015 (3,81 - 5,80mm) e o mínimo no período de 02/08/2021 (2,02 - 4,60mm). As áreas de superfície que apresentam os maiores valores (tons azuis) foram registradas nas áreas do pomar de manga e manguezal. Por outro lado, os menores valores (tons amarelo-avermelhado) correspondem a área em expansão urbana e parte da feição de apicum. Considerando ainda a variação temporal entre as imagens de  $ET_r$ , observa-se uma tendência decrescente em que os maiores valores foram encontrados na cena de 2015, período que ocorreu o fenômeno El Niño, onde a temperatura do ar esteve acima do

normal climatológica, o que aumenta a taxa de evapotranspiração da área (NUNES et al., 2017).

Figura 18- Distribuição espacial da Evapotranspiração diária (mm) nos três anos estudados na área do pomar de manga e circunvizinhança. Sítio experimental de Cuiarana, município de Salinópolis-PA.



Fonte: Da Autora.

No estado do Pará, o efeito desse fenômeno também afetou o experimento de Sousa et al. (2020) com feijão-caupi, onde o El Niño ocasionou a diminuição de chuvas e o leve aumento na temperatura do ar, sendo registrado em 2015 (28,03°C) e 2016 (27,20°C) na região de estudo, como consequência, a evapotranspiração de referência foi maior em 2015 (5,03 mm.dia-1) do que em 2016 (4,95 mm.dia-1).

Rodrigues et al. (2013), ao analisarem o consumo hídrico das cultivares de mangueira Tommy Atkins na mesma área de estudo, obtiveram resultados semelhantes de ETr. Por sua vez, Silva et al. (2018), ao utilizarem imagens de Landsat 8 e o algoritmo SEBAL para a obtenção de ETr, obtiveram valores médios de  $ET_{24h}$  variando de 3,23 a 5,02 mm dia<sup>-1</sup>, o que indica que o pomar de manga contribui predominantemente na evapotranspiração local, favorecendo no microclima das áreas circunvizinhas (RIBEIRO et al., 2018).

As imagens de 2017 e 2021 apresentaram baixos valores de evapotranspiração, devido a intensidade da anomalia térmica ocasionada pelo El Niño de 2015, que pode ter afetado as condições hídricas do solo e como consequência ter causado um estresse hídrico nas plantas (AMADO; PROCHNOW; ELTZ, 2002). A evapotranspiração compreende um processo de perda de água do solo e da planta, e sua estimativa é fundamental para o planejamento de atividades agrícolas como projetos de irrigação e outorga de recursos hídricos (SILVA et al., 2012).

Áreas que apresentam baixo saldo de radiação ( $R_n$ ) como as áreas urbanas, tendem a ter uma baixa evapotranspiração e disponibilidade de energia para convecção e precipitação (SANTOS et al., 2014). Segundo Ferreira Júnior et al. (2013), valores estimados de evapotranspiração para vegetação do bioma amazônico por meio da metodologia SEBAL, mostraram como a vegetação pode influenciar as medidas de temperatura superficial, tendo um papel decisivo na umidade local, principalmente para o período seco.

Conforme Tavares et al. (2014), elevadas temperaturas podem aumentar significativamente a evapotranspiração de uma área, incrementando a umidade do ar, por outro lado havendo a diminuição da umidade do solo e reduzindo os recursos hídricos superficiais, inclusive os disponíveis para a irrigação. Outra situação a se considerar é o aumento de salinização nessas áreas, tornando áreas hoje agricultáveis em desérticas. Esses autores relatam ainda que a biodiversidade será reduzida, a produtividade agrícola e pecuária irá diminuir e haverá aumento de doenças transmitidas por insetos.

A grande extensão do pomar de manga situado entre a área urbana e a vegetação de mangue e apicum aparece como um elemento estratégico na redução dos efeitos térmicos causados pelas mudanças climáticas e como cortina verde na mitigação de odores emitidos por estações de esgoto (MARTINS; MORAES; 2017, SILVA et al., 2018). Segundo Andrade et al. (2014), quanto maior a arborização no ambiente, menor será a quantidade de energia

solar convertida em calor sensível, sendo a mesma transformada em calor latente, o que favorece as condições microclimáticas no ambiente urbano, impulsionada pelo fenômeno da evapotranspiração.

### 5.3 Comparação e validação da evapotranspiração real diária obtida pelo algoritmo SEBAL com métodos empíricos

Para verificar a eficiência do método e validar os resultados das estimativas de evapotranspiração, é aplicado uma combinação de métodos meteorológicos baseados em dados e métodos de sensoriamento remoto (BEZERRA; BEZERRA; RÊGO, 2021). Assim, a evapotranspiração real diária (ET<sub>24h</sub>) determinada pelo algoritmo SEBAL para a área de estudo foi comparada aos resultados obtidos pelo método padrão da FAO, PenmanMonteith e pelo método da Razão de Bowen, com seus respectivos erros estatísticos, a fim de validar as estimativas obtidas, conforme descrito na Tabela 5 e 6.

Tabela 5-Comparação entre a evapotranspiração obtida pelo algoritmo SEBAL e a obtida pelo modelo de Penman- Monteith, com seus respectivos erros relativo (ER), absoluto (EA) e a raiz do erro quadrático (REQ).

Dia do Ano	Imagem (Data)	Etr (SEBAL)	ETr (Penman Monteith)	EA	ER	REQ
		mm/dia	mm/dia	mm/dia	%	mm/dia
214	02/08/2015	4,805	4,90	0,09	1,8%	0,01
187	06/07/2017	4,085	4,19	0,11	2,6%	0,01
214	02/08/2021	3,31	4,91	1,60	32,6%	2,56

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6- Comparação entre a evapotranspiração obtida pelo algoritmo SEBAL e a obtida pelo Método da Razão de Bowen, com seus respectivos erros relativo (ER), absoluto (EA) e a raiz do erro quadrático (REQ).

Dia do Ano	Imagem (Data)	Etr (SEBAL)	Razão de Bowen	EA	ER	REQ
		mm/dia	mm/dia	mm/dia	%	mm/dia
214	02/08/2015	4,805	6,02	1,21	20,1%	1,47
187	06/07/2017	4,085	4,63	0,55	11,8%	0,30
214	02/08/2021	3,31	4,11	0,80	19,5%	0,65

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que, as evapotranspirações reais diárias obtidas pelo algoritmo SEBAL, apresentaram valores inferiores para todas as datas analisadas ao comparar com as calculadas pelo modelo de Penman-Monteith e Razão de Bowen. Conforme os valores apresentados na Tabela 5, os valores dos erros absolutos foram na ordem de 0,09 a 1,60 mm.dia<sup>-1</sup>, enquanto os erros relativos foram em média de 12%, com erro mínimo de 1,8% e máximo de 32,6%. Por outro lado, ao comparar os resultados do SEBAL com o método da Razão de Bowen, foi verificado que os erros estatísticos foram superiores ao de Penman-Monteith, apresentando valores de erros absolutos de valor mínimo de 0,55mm. dia<sup>-1</sup> e valor máximo de 1,21 mm.dia<sup>-1</sup>, enquanto os erros relativos foram em média de 17,2%, com erro mínimo de 11,8% e máximo de 20,1%.

Segundo Oliveira et al. (2014), as melhores estimativas são dadas por aqueles menores erros relativos percentuais, logo pode-se inferir que as estimativas obtidas pelo SEBAL e Penman- Monteith foram aproximadas, sendo o período 02/08/2021 o único que apresentou valor de erro superior a 10%, assim os resultados obtidos nesta pesquisa foram coerentes em margem de erros.

Mediante esses resultados pode-se afirmar que o algoritmo SEBAL é uma técnica eficiente, pois além de estimar a evapotranspiração, ele pode inferir sobre alterações de áreas degradadas ou em processo de degradação por meio dos termos do balanço de energia na superfície e do NDVI, onde índices muito baixo, albedo elevado e baixa evapotranspiração sugerem áreas degradadas, de solo exposto ou pouco vegetadas e secas (MOREIRA et al. 2010).

## 6 CONCLUSÃO

O uso de imagens do satélite Landsat 8 - OLI e o algoritmo SEBAL permitiram compreender a variação espacial e temporal dos parâmetros biofísicos do fluxo de energia na área do pomar de manga e seu entorno. Esse algoritmo foi capaz de estimar a evapotranspiração e os componentes do balanço de energia de maneira satisfatória.

Os valores das variáveis NDVI, LE, Rn e ETr foram maiores nas áreas com cobertura vegetal como o pomar de manga e o manguezal. Já as áreas urbanizadas e as áreas de feição de apicum favoreceram os maiores valores de temperatura de superfície, calor sensível e de albedo em detrimento da baixa cobertura vegetal. Das imagens utilizadas, as de 02/08/2021 obtiveram maiores valores para a maioria dos parâmetros, exceto para a temperatura de superfície e evapotranspiração real diária que foram mais elevadas nas imagens de 02/08/2015.

O SEBAL propiciou resultados da ETr com nível de precisão satisfatório quando comparado com as estimativas da razão de Bowen e com o método de Penman-Monteith, resultando em erros estatísticos em concordância com a literatura. Os resultados encontrados sugerem que é possível calcular efetivamente a ETr e os componentes do balanço de energia em escala regional mediante a aplicação do modelo SEBAL em combinação com dados detectados remotamente. Dessa forma, o modelo torna-se uma ferramenta de sensoriamento remoto de grande importância para o gerenciamento de recursos hídricos em áreas em larga escala por meio da estimativa de evapotranspiração, minimizando o desenvolvimento de estações terrestres onerosas, especialmente em bacias hidrográficas onde há predominância da agricultura irrigada.

## REFERÊNCIAS

- ABER, J. D.; MELILLO, J. M. **Terrestrial ecosystems**. San Diego: Academic Press, 2001. 556p.
- ALENCAR, L.P.; SEDIYAMA, G.C.; MANTOVANI, E.C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub> padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 39-50, 2015.
- ALHO, Cleber Junior. Importância da biodiversidade para a saúde humana: uma perspectiva ecológica. **Dossiê Sustentabilidade • Estud.** v. 26, n.74, p. 151-166, 2012.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998. 300p.
- ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSSEN, W.; WATERS, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advanced training and user's manual, **Idaho Implementation**, version 1.0, 2002.
- ALLEN, R., A; IRMAK, R.; TREZZA JM; HENDRICKX, W.; BASTIAANSSEN E J. KJAERGAARD. Estimativa ET baseada em satélite na agricultura usando SEBAL e METRIC.” **Processos Hidrológicos**, v.25, n.26 p: 4011 – 4027, 2011.
- ALMEIDA, L. S. D.; GAMA, J. R. V. Quintais agroflorestais: estrutura, composição florística e aspectos socioambientais em área de assentamento rural na Amazônia brasileira. **Ciência Florestal**, v. 24, p.1041-1053, 2014.
- ALVES, L. E. R.; GOMES, H. B.; SANTOS, M. N.dos; FREITAS, I. G. F.de. Balanço de radiação através do satélite Landsat-8 na bacia do Rio Pajeú. **Revista do Departamento de Geografia**, v.33, p.117-127, 2017.
- ALVES, V. E. L.; AQUINO, J. R.de; SILVA FILHO, R. I.da. A modernização da fruticultura irrigada e seus impactos socioeconômicos e ambientais no Vale do Açú/RN. **Revista GeoInterações**, v.2, n.1, p.35-56, 2018.
- AMADO, T. J. C.; PROCHNOW, D.; ELTZ, F. L. F. Perdas de solo e água em períodos de anomalias climáticas: " El Niño " e " La Niña " no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 819-827, 2002.
- ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; MAGALHAES JUNIOR, W. C. P. de. Estimativa da evapotranspiração em áreas de pastagens usando algoritmo SEBAL e imagens Landsat 5 - TM . **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 2, p. 362-372, 2018.
- ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J. M.; MENEZES, S. J. M. DA C. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando o SEBAL e imagens Landsat. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 433-442, 2014.

ANDRADE, V.M.S.; CORDEIRO, I.M.C.C.; SCHWARTZ, G.; RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; OLIVEIRA, F. de A. Considerações sobre clima e aspectos edafoclimáticos da mesorregião nordeste paraense. *In*: CORDEIRO, I. M. C. C.; RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; SCHWARTZ, G.; OLIVEIRA, F. de A. **Nordeste Paraense: panorama geral e uso sustentável das florestas secundárias**. Belém: Embrapa Eastern Amazon, 2017.

ARAÚJO, J. G.; ALMEIDA, M. C.de; MARTINS, C. M.; SANTOS, M. A. S.dos; SANTANA, A. C.de; REBELLO, F. K. Custos de produção e rentabilidade econômica da pesca artesanal em Cuiarana, Salinópolis, Pará, Brasil. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v.13, n.3, p.847-865, 2020.

ARAÚJO, M. G.S. de; ARAÚJO, S. R.; SOUZA, L. S.de; FREIRE, A. A. P. NDVI como ferramenta de avaliação da expansão urbana em área de proteção ambiental no município de Belém-pa. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v.8, n.4, p.386-402, 2019.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. 2 ed. San Diego, California, USA: Academic Press, 2001. 420p.

ATAIDE, W. L. da S.; OLIVEIRA, F. de A.; PINTO, C. A. D. Balanço de radiação, energia e fechamento do balanço em uma floresta prístina na Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n.6, p. 2603-2627, 2020.

AYRIMORAES, S.; PERDIGÃO, C.; TRÖGER, F. Planejamento e estudos sobre segurança hídrica no Brasil. **Diálogos Socioambientais**, v. 5, n. 15, p. 9-14, 2022.

BASTIAANSEN, 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.

BASTIAANSEN, W., E.; NOORDMAN, H. PELGRUM, G.; DAVIDS, B.; THORESON, AND R. ALLEN. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, n.1, p.85–93, 2005.

BASTIAANSEN, 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.

BEZERRA, P. E. S., MORAES, E. D., SOARES, I. D. C. Análise da Temperatura de Superfície e do Índice de Vegetação no Município de Belém na Identificação das Ilhas de Calor. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.70, n.3, p.803-818, 2018.

BEZERRA, H. N.; BEZERRA, J. M.; RÊGO, A. T. A. Avaliação do método SEBAL para estimativa da evapotranspiração real diária no semiárido brasileiro. **Rev. Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 17, n. 47, p. 183-201, abr./jun. 2021.

BORGES, Cícera J. R. *et al.* Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 393-399, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Atlas dos manguezais do Brasil**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/centrais-de-conteudo/atlas-dos-manguezais-do-brasil-pdf>. Acesso em: 15 de agosto de 2022.

CANTELE, T.D.; LIMA, E. de C.; BORGES, L. A. C. Panorama dos recursos hídricos no mundo e no Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, n. 4, p. 1259-1282, 2018.

CALLEJAS, I. J. A.; NOGUEIRA, M. C. D. J. A.; BIUDES, M. S.; DURANTE, L. C. Variação sazonal do balanço de energia em cidade localizada na região central do Brasil. **Mercator**, Fortaleza, v.15, p.85-106, 2016.

CAMARGO, W. P. F.; ALVES, H. S.; MAZZEI, A. R. Mercado de manga no Brasil: contexto mundial, variedades e estacionalidade. **Informações Econômicas**, v. 34, n. 5, 2004.

CAMPOS, João H. B. da C. *et al.* Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 150-156, 2008.

CAMPOS, M. S.; ADAMI, M.; ARAÚJO, A. C. D. Análise do Albedo de Superfície da Palma de óleo e Diferentes Usos e Coberturas do Solo no Leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.36, p.15-21, 2021.

CARDOSO, G. B.; VIANA, T. V. A.; AZEVEDO, B. M.; SOUSA, V. F.; SOUZA, F. Determinação da ET de referência pela razão de Bowen com psicrômetros instalados a diferentes alturas. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, p.16-23, 2005.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.

CEMIN, G. **Utilização do sensoriamento remoto para a caracterização e discriminação espectral de vinhedos em diferentes terroirs**. 2009. 95f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment.**, v. 113, p. 893-903, 2009.

COELHO, A.L.N.; CORREA, W.S.C. Temperatura de superfície celsius do sensor tirs/landsat-8: metodologia e aplicações. **Rev. Geogr. Acadêmica**, v.7, n.1, p. 31-45, 2013.

COELHO, E. F.; SANTOS, D. L.; SIMOES, W. L. Irrigação de fruteiras tropicais (abacaxizeiro, bananeira, mamoeiro e mangueira). *In*: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E. C. (ed.). **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura**. Piracicaba: ESALQ-USP, 2021. p. 454-460.

CORDEIRO, Z. J. M.; BORGES, A. L. **Sistema orgânico de produção de manga para a região da Chapada Diamantina, Bahia**. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2020.

COSTA JÚNIOR, V. G.S; SANTOS, C.A.C.dos; SILVA, T.L. do V. Balanço de energia à superfície em áreas heterogêneas através de algoritmos de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.10, n.2, 454-467, 2017.

COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, n.15, p. 253-260, 1997.

DANTAS, V. D. A.; SILVA, V. D. P.da; COSTA, A. C.da; CHAGAS, G. F. das. Fluxos de calor no dossel vegetativo e infiltração de água no solo, em floresta tropical. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, 12, p.1266-1274, 2011.

DECHANT, B. *et al.* Canopy structure explains the relationship between photosynthesis and sun-induced chlorophyll fluorescence in crops. **Remote Sensing of Environment**, v.241, e.111733, 2020.

DEBASTIANI, A. B.; SÁ, E. A. S.; MARTINS NETO, R. P.; SCHIMALSKI, M. B. Mapeamento do saldo de radiação no Parque Nacional de São Joaquim–SC. **Advances in Forestry Science**, v.5, n.3, p.363-367, 2018.

FARAH, H. O.; BASTIAANSEN, W. G. M. Impact of spatial variations of land surface parameters on regional evaporation: a case study with remote sensing data, **Hydrol. Process**, v.15, n.20, p. 1585–1607, 2001.

FARIA-SILVA, L.; GALLON, C.Z.; SILVA, D. Moura. Photosynthetic performance is determined by scion/rootstock combination in mango seedling propagation. **Scientia Horticulturae**, v.265, e109247, 2020.

FAUSTO, Marcos Alves *et al.* Impacto da alteração do uso do solo no saldo de radiação no Cerrado do sul de Mato Grosso. **Rev. Ambient. Água** [online], v.11, n.2, p.350-361, 2016.

FERNANDES, D. A. J.; VITORINO, M. I.; JARDIM, M. A. G. Efeito da radiação solar sobre a regeneração natural de manguezal em Cuiarana, Salinópolis, Pará. **Brazilian Journal of Environmental Sciences** (Online), v.49, p.108-122, 2018.

FERREIRA JUNIOR, P.; SOUSA, A. M.; VITORINO, M. I.; SOUZA, E. B.de; SOUZA, P. J. O. P.de. Estimativa de evapotranspiração, no Leste da Amazônia utilizando SEBAL. **Revista de Ciências Agrárias-Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v.56, n.1, 33-39, 2013.

FERRER, M.; ECHEVERRÍA, G.; PEREYRA, G.; GONZALEZ-NEVES, G.; PAN, D.; MIRÁS-AVALOS, J.M. Mapping vineyard vigor using airborne remote sensing: relations with yield, berry composition and sanitary status under humid climate conditions. **Precision Agriculture**, v.21, n.1, p178-197, 2020.

FONSECA, N. **Propagação da mangueira (*Mangifera indica* L.)**. Cruz das Almas, BA: Embrapa, 2009. (Circular Técnica).

GAN, G.; LIU, Y. Inferring transpiration from evapotranspiration: A transpiration indicator using the Priestley-Taylor coefficient of wet environment. **Ecological Indicators**, v.110, e 105853, 2020.

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, n.3, p. 67-73, 2015.

GERMANO, M. F.; VITORINO, M. I.; COSTA, G. B.; SOUZA, A. M. L.de; SOUTO, J. I. de Oliveira. Variabilidade atmosférica da precipitação associada com as circulações de brisas marítimas e terrestres no nordeste do estado do Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais**, v.11, n.3, p.303-312, 2016.

GIORDANO, D. E.; KRÜGER, E. Potencial de redução da temperatura de superfície pelo aumento do albedo nas diversas regiões brasileiras. **Paranoá**, v.11, n.11, p.1–22, 2018.

GOMES, H. B.; CAVALCANTE, L. B.; SILVA JUNIOR, R. S. da.; SANTOS, M. N. D. Temperatura da superfície e albedo na região de Ilha Solteira, São Paulo. **Mercator**, Fortaleza, v.16, e16018 2017. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2017.e16018>.

GOMES, J. B.; WEBLER, A. D.; AGUIAR, R. G.; AGUIAR, L. J. G.; NUÑES, M. L. A. Conversão de florestas tropicais em sistemas pecuários na amazônia: quais as implicações no microclima da região? (conversion of tropical forests in livestock systems in the amazon: what are the implications for the microclimate of the region?). **Revista Brasileira de Climatologia**, v.17, p. 67-81, jul./dez. 2015.

GÓMEZ, J. M. *et al.* A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n.3, e3312, 2018. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342>.

GONÇALVES, M.F; BLANCO, C. J.C. Estimativa de precipitação anual no Norte do Brasil considerando os efeitos dos eventos ENOS: El Niño e La Niña. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica**, v.13, n.1, p-172-187, 2020.

GUAN, H.; DONG, X. Influence of thinning intensity on canopy structure and light environment inside *Larix gmelinii* secondary forest. **Beijing Linye Daxue Xuebao/Journal of Beijing Forestry University**, v.40, n.10, p.13-23, 2018.

GUERRA, G. A. D.; PAIVA, R.S. Ocorrência de Cuicaneiras em Salinópolis, no Pará, Brasil. **Novos Cadernos NAEA**, v. 19, n. 2, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5801/ncn.v19i2.1843>.

GUEVARA GARCÍA, M.; GONZÁLEZ LAIME, S.; ÁLVAREZ LEÓN, A.; RIAÑO MONTALVO, A.; GARRIDO GARRIDO, G.; NUÑEZ SELLES, A. J. Uso etnomédico de la corteza de *Mangifera indica* L. en Cuba. **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, v.9, n.1, p. 1-6, 2004.

HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R.; HORNERO, A.; MOTTUS, M.B; PENUELAS, J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; JIMÉNEZ, J.C.; SUÁREZ, L.; ALONSO, L.; ZARCO-TEJADA, P.J. Early Diagnosis of Vegetation Health From High-Resolution Hyperspectral and Thermal Imagery: Lessons Learned From Empirical Relationships and Radiative Transfer Modelling. **Current Forestry Reports**, v.5, n.3, p. 169-183, 2019.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Produção agrícola municipal**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 30 de abril de 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC. **Relatórios**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acesso em 02 de fev. 2022.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução: Epiphany et al. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J.L.M.de; SILVA, L.C.R. Sensitivity of ASCE-Penman–Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate Dynamics**, v.53, n.1-2, pp. 943-956, 2019.

JOSEPH, L.; SCHMITT FILHO, A.; SINISGALLI, P.; FARLEY, J.; ZAMBIAZI, D. Sistemas silvipastoris e serviços ecossistêmicos: a visão dos produtores de leite da capital da agroecologia no Sul do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n.3, p. 829-841, 2019.

KRIZEK, João Pedro Ocanha; SANTOS, Luciana Cavalcanti Maia. Protocolo metodológico para obtenção dos valores de reflectância e de NDVI de imagens Landsat 8/OLI utilizando LEGAL. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 02, p. 869-880, 2021.

LEDESMA, N.; CAMPBELL, R.J. The status of mango cultivars, market perspectives and mango cultivar improvement for the future. **Acta Horticulturae**, v.1244, p.23-27, 2019.

LEE, Y. G.; JUNG, C. G.; AHN, S. R.; KIM, S. J. Estimation of spatial evapotranspiration using Terra MODIS satellite image and SEBAL model in mixed forest and rice paddy área. **Journal of Korea Water Resources Association**.v.49, n.3, p.227-239, 2016.

LEVIZZANI, V.; CATTANI, E. Satellite remote sensing of precipitation and the terrestrial water cycle in a changing climate. **Remote Sensing**, v.11, n.19, p.2301, 2019.

LEITE, A.P.; SANTOS, G.R.; SANTOS, J. É. O. Análise temporal dos índices de vegetação NDVI e SAVI na estação experimental de Itatinga utilizando imagens Landsat 8. **Revista brasileira de energias renováveis**, v. 6, n. 4, p. 606-623, 2017.

LIBERATO, A. M.; BRITO, J. I. B. Influência de mudanças climáticas no balanço hídrico da Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.3, n.3, p.170-180, 2010.

LIMA, E. M. de; FURTADO, A. C. S.; RODRIGUES, S.; SOUZA, F. I. B.de. Estudo de caso de caráter sociocientífico sobre a utilização de *Mangifera indica* L. na medicina popular. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL, 23., 2019, Belém, PA. **Anais[...]**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2019.

LIMA, R. T. D.; SOUZA, P. J. D. O. P. D.; RODRIGUES, J. C.; LIMA, M. J. A. D. Modelos para estimativa da área foliar da mangueira utilizando medidas lineares. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.34, n.4, p.974-980, 2012.

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. **GEOUSP Espaço e Tempo** (Online), v.20, n.3, p.657-675, 2016.

LINS, F. A. C.; MONTENEGRO, A. A. D. A.; FARIAS, C. W. L. D. A.; CHAGAS, A. M. S. D.; MIRANDA, R. D. Q.; GALVÍNCIO, J. D. Análise da dinâmica temporal da evapotranspiração real em uma bacia hidrográfica do semiárido através de modelagem hidrológica e sensoriamento remoto. **Irriga**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 543-564, 2021.

LONGO-MINNOLO, G.; VANELLA, D.; CONSOLI, S.; INTRIGLIOLO, D.S.; RAMÍREZ-CUESTA, J.M. Integrating forecast meteorological data into the ArcDualKc model for estimating spatially distributed evapotranspiration rates of a citrus orchard. **Agricultural Water Management**, v.231, e105967, 2020.

MACHADO, ???? et al. Sazonalidade do Balanço de Energia e Evapotranspiração em Área Arbustiva Alagável no Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, 82-91, 2016.

MACHADO, C. C.; SILVA, B. B. da; ALBUQUERQUE, M. B.de; GALVINCIO, J. D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM - Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. **Rev. Bras. Meteorol.** [online], v.29, n.1, p. 55-67, 2014.

MACHADO, W. R. B.; CARVALHO, R. M.de; F???? NETO, A. Avaliação das perdas de manga no mercado varejista do Vale do São Francisco. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, p. 75-90, 2017.

MACIEL, M. de N. M.; WATZLAWICK, L.F.; SCHOENINGER, E. R.; YAMAJI, F. M. Efeito da radiação solar na dinâmica de uma floresta. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.4, n.1, p. 101-114, 2002.

MARENGO, J.A.; SOUZA JR, C. **Mudanças climáticas: impactos e cenários para a Amazônia**. São Paulo: ALANA, 2018.

MARKHAM, B. L.; BARKER, L. L. Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.

MARTINS, C.N.; MORAES, P.E. S. Como as cortinas verdes podem mitigar os impactos de uma ETE às populações residentes em seu entorno. **Revista Qualidade Emergente**, v. 8, n. 2, p. 1-16, 2017.

MARTINS, A. P.; ROSA, R. Estimativa de evapotranspiração real a partir de imagens do sensor MODIS/AQUA e do algoritmo SEBAL na bacia do Rio Paranaíba–Brasil/Real evapotranspiration estimate from images of MODIS/AQUA sensor and SEBAL algorithm in Paranaíba river basin–Brazil. **Caderno de Geografia**, v.29, n.57, p.351-367.2019.

MEDEIROS, R. L.B.DE; MENESES S.G.de; FIGUEIREDO, C. F. V.de; SOUSA FORMIGA, A. C.de; OLIVEIRA, F. F. D.de; OLIVEIRA, P. A. T.de; LEITE, A. C. N. Resposta espectral do comportamento do NDVI e NDWI diante de diferentes intensidades pluviométricas na cidade de Patos–PB. **Research, Society and Development**, v.11, n.3, e49811326819, 2022.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F. D.; ANDRÉ, R. G. B.; SILVA, B. B. D.; FERREIRA, N. D. J. Estimativa do fluxo do calor sensível utilizando o algoritmo sebal e imagens modis para a região norte fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, p.85-94, 2012.

MENEZES, S. J. M. da C. de; SEDIYAMA, G. C.; SOARES, V. P., GLERIANI, J. M.; ANDRADE, R. G. Evapotranspiração regional utilizando o sebal em condições de relevo plano e montanhoso. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, v.17, n.6, p.491-503, 2009.

MENZEL, C.M.; Le LAGADEC, M.D. Can the productivity of mango orchards be increased by using high-density plantings? **Scientia Horticulturae**, v.219, p.222-263, 2017.

MOREIRA, Elvis Bergue Mariz *et al.* O Modelo Sebal para Estudos de Clima Intraurbano: Aplicação em Recife, Pernambuco, Brasil-The Sebal Model For Climate Intra-Urban Studies: Application In Recife, Pernambuco, Brazil. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 39, p. 247-265, 2017.

MORENO, M. C.; DIAS, P. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; AMARAL, G. C.; FIRMINO, C. T.; TOLEDO, J. V. O papel do dossel de uma floresta estacional semidecidual na definição microclimática próximo ao solo. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.10, p. 35-46, 2021.

MOREIRA, E. B. M.; NÓBREGA, R. S.; SILVA, B. B. D. Estimativa do saldo de radiação instantâneo na cidade do Recife, através de imagens do satélite Landsat 5 TM. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.4, n.3, 589-601, 2011.

MOREIRA, L. C. J.; DURAND, B. J.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.6, p.1148-1159, 2010.

MORILLAS, L. *et al.* Tree Mortality Decreases Water Availability and Ecosystem Resilience to Drought in Piñon-Juniper Woodlands in the Southwestern U.S. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v.122, n.12, p.3343-3361, 2017.

MOURA, M. S. B.; OLIVEIRA, L. D. S.; EVANGELISTA, S. R. M.; MOUCO, M. D. C.; SOUZA, L. S. B.de; SILVA, T. D. Aptidão climática da mangueira frente ao clima atual e aos cenários futuros. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, p. 496-509, 2015.

MOUCO, MA do C. **Cultivo da mangueira**. Petrolina: Embrapa Semiárido-Sistema de Produção (INFOTECA-E), 2010.

NUNES, L. P. M.; SANTOS, J. S.dos; SILVA, S. C. S.; PIMENTEL, M. A. Variação da temperatura do solo no leste da Amazônia. *In*: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 17; CONGRESSO NACIONAL DE GEOGRAFIA FISICA, 1., 2017, Campinas-SP. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**: anais. Campinas-SP: Instituto de geociências UNICAMP, 2017. v.1, p.4787-4797.

OLIVEIRA, M. T. de.; GANEM, K. A.; BAPTISTA, G. M. de M. Análise sazonal da relação entre sequestro de carbono e ilhas de calor urbanas nas metrópoles de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n.4, p. 807-825, 2017.

OLIVEIRA, L. L. de; SILVA, T. M. R.; COSTA BARRETO, N. D. J. da, CASTRO CANANI, L. G. de; ALMEIDA, R. M. Influência do El Niño Oscilação Sul–ENOS– (2015/2016) no regime hidrológico e geração de energia na usina hidrelétrica de Curuá-Una, Amazônia central. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.4, p.136-144. 2020.

OLIVEIRA, L. M.de; MONTENEGRO, S. M.; SILVA, B. B. D.; ANTONINO, A. C.; MOURA, A. E. de. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18, p. 1039-1046, 2014.

OLIVEIRA, L. M.; MONTENEGRO, S. M.; AZEVEDO, J. R. G.de; SANTOS, F. X. dos. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.1, 58-67,2008

OLIVEIRA, P.D.D. de. Situação econômica da fruticultura irrigada no submédio do são francisco: avaliação dos últimos anos. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 7, n. 6, p. 823-842, 2021.

PAUL-LIMOGE, E.; WOLF, S.; SCHNEIDER, F.D.; LONGO, M.; MOORCROFT, P.; GHARUN, M.; DAMM, A. Partitioning evapotranspiration with concurrent eddy covariance measurements in a mixed forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.280, e107786, 2020.

PEREIRA, A. B.; NOVA, N. A.V.; ALFARO, A. T. Necessidades hídricas de citros e macieiras a partir da área foliar e da energia solar. **Rev. Bras. Frutic.**, v.31, n.3, p.671-679, 2009.

PEREIRA, O. A.; DANELICHEN, V. H. de Moraes; FERREIRA, N. F. C.; SANTOS, E. N.dos; NOVAIS, J. W. Z.; CAMARGO, H. H. C.; SILVA FILHO, B. F.da. Tópicos do método da razão de Bowen. **Uniciências**, v.25, n.1, 64-69, 2021.

PÉREZ, M.; PUCHE, M.; SOTO, E.; FIGUEROA, R.; GUTIERREZ, M.; AVILÁN, L. El régimen hídrico como determinante ambiental en la iniciación floral de los cultivares de mango (*Mangifera indica* L.) Haden y Edward en condiciones tropicales. **Revista Científica UDO Agrícola**, v. 12, n. 4, p. 770-778, 2012.

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; GALLO, P.B. Radiação solar e saldo de radiação em cultivo de café a pleno sol e consorciado com banana'prata anã. **Bragantia**, v. 64, p. 485-497, 2005.

PIMENTEL, M.; SILVA, B.B.da. Uso e cobertura do solo e seus efeitos na distribuição da temperatura de superfície em área urbana. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 06, p. 1598-1616, 2013.

PINHEIRO, J. M. Alterações pluviométricas em 41 anos (1975-2015) ocasionadas por eventos de el niño na Ilha do Maranhão, Pré-Amazônia Brasileira. *In*: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 17; CONGRESSO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA, 1., 2017, Campinas-SP. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**: anais. Campinas-SP: Instituto de geociências UNICAMP, 2017. v.1, p.1422-1431.

PISMEL, V. A. M.; MARTORANO, L. G.; MONTEIRO, D. C. A.; LISBOA, L. S. S. Produto modis associado à condição hídrica no solo para diferenciar padrões na vegetação no município de Dom Eliseu, Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.19, p. 178-190, jul./dez. 2016.

PÔÇAS, I.; CALERA, A.; CAMPOS, I.; CUNHA, M. Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. **Agricultural Water Management**, v.233, e106081, 2020.

POTOPOVÁ, V.; TRNKA, M.; HAMOUZ, P.; SOUKUP, J.; CASTRAVEŤ, T. Statistical modelling of drought-related yield losses using soil moisture-vegetation remote sensing and multiscalar indices in the south-eastern Europe. **Agricultural Water Management**, v. 236, e106168, 2020.

QUBAJA, R.; AMER, M.; TATARINOV, F.; ROTENBERG, E.; PREISLER, Y.; SPRINTSIN, M.; YAKIR, D. Partitioning evapotranspiration and its long-term evolution in a dry pine forest using measurement-based estimates of soil evaporation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.281, e 107831, 2020.

QUERINO, C. A. S.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; QUERINO, J. K. A. da S.; NETO SANTOS, L. A.; SILVA, M. J. G.da; ARRUDA, P.H.Z. de; NOGUEIRA, J. S. Balanço de ondas curtas sobre floresta sazonalmente alagável do pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.20, p. 252-266, jan./jul. 2017.

QUERINO, C.A.S.; MOURA, M.A.L.; QUERINO, J.K.A. da S. Impacto do desmatamento de uma área de mangue no albedo superficial. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 401-408, 2013.

RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R.; FORTES, L. T. G. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990**. Brasília,DF: INMET, 2009. 465 p.

RASHID, M.A.; JABLOUN, M.; ANDERSEN, M.N.; ZHANG, X.; OLESEN, J.E. Climate change is expected to increase yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v.222, p.193-203, 2019.

RIBEIRO, K. F. A.; VALIN JR, M. D. O.; SANTOS, F. M. D. M.; NOGUEIRA, M. C. D. J. A.; NOGUEIRA, J. D. S. Estudo da influência do sombreamento arbóreo nos índices de conforto térmico na cidade de Cuiabá–MT. **Ambiência**, v.14, n.2, p.300-314, 2018.

ROCHA, V. M.; CORREIA, F. W. S.; SILVA, P. R. T. D.; GOMES, W. B.; VERGASTA, L. A.; MOURA, R. G. D.; SILVA, J. J. S. D. Reciclagem de precipitação na Bacia Amazônica: o papel do transporte de umidade e da evapotranspiração da superfície. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p.387-398, 2017

RODRIGUES, J. C.; SOUZA, P.J. de O. P. de.; LIMA, R. T. de. Estimativa de temperaturas basais e exigência térmica em mangueiras no nordeste do estado do Pará. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal - SP, v. 35, n. 1, p. 143-150, 2013.

RODRIGUES, G. D. S.; MOURA, M. S. B.de.; MOUCO, M. D. C.; SOUZA, L. S. B.de; OLIVEIRA, L. D. S. Impacto do aumento de temperatura na produção da mangueira. **Embrapa**, 2015.

RODRIGUES, J. C.; LIMA, R. T.de; SOUZA, P. J. D. O.de; SOUSA, A. M.de; COSTA, D. L. Consumo hídrico da mangueira através da técnica da razão de bowen no nordeste paraense, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 18.; REUNIÃO LATINO AMERICANO DE AGROMETEOROLOGIA, 7., 2013, Belém-Pa. **Anais[...]**. Belém-Pa: SBAGRO, 2013, p. 1-6. <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/3343.pdf>.

RODRÍGUEZ, N. C.; VITORINO, M. I.; BERRÊDO, J. F.; JARDIM, M. A. G.; SOUSA, A. M. L. D.; SILVA, P. V. C. D. Avaliação do manguezal na economia e estratégia de mudança do clima: estudo de caso de Cuiarana, Pará, na Amazônia Brasileira. **Revista Árvore**, v.43, n.5, 2019. <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000500003>.

ROZENSTEIN, O.; QIN, Zhihao; DERIMIAN, Yevgeny; KARNIELI, Andarnon. Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm. **Sensors**, v.14, p.5768-5780, 2014.

RUDKE, A. P.; SOUZA, V. A. S.de; SANTOS, A. M.dos; XAVIER, A. C. F.; ROTUNNO FILHO, O. C.; MARTINS, J. A. Impact of mining activities on areas of environmental protection in the southwest of the Amazon: A GIS-and remote sensing-based assessment. **Journal of Environmental Management**, v.263, e110392, 2020.

RUHOOF, A. L.; SILVA NOVO, B. B.; ROCHA, H. R. Determinação da irradiância solar no topo da atmosfera para cálculo do albedo e balanço de energia a partir de imagens LANDSAT 8 OLI. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17., 2015, João Pessoa-PB. **Anais[...]**. João Pessoa-PB: INPE, 2015. p. 4495-4502

SABINO, M.; SILVA, J. B. D.; COSTA, R. D. O.; DUARTE, L. G.; SOUZA, A. P. D. Parâmetros biofísicos e índices de extremos de temperatura do ar na transição Cerrado-Amazônia. **Sociedade & Natureza**, v.32, p.490-500, 2022.

SANO, E. E.; MATRICARDI, E. A. T.; CAMARGO, F. F. Estado da Arte do Sensoriamento Remoto por Radar: Fundamentos, Sensores, Processamento de Imagens e Aplicações. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 72, p. 1458–1483, 2020.

SANTOS, Carlos Antonio Costa dos *et al.* Obtenção do saldo de radiação em áreas de pastagem e floresta na Amazônia (estação seca) através do sensor MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 420-432, 2014.

SANTOS, M. R. D. S.; VITORINO, M. I.; PEREIRA, L. C. C.; PIMENTEL, M. A. D. S.; QUINTÃO, A. F. Vulnerabilidade Socioambiental às Mudanças Climáticas: Condições dos Municípios Costeiros no Estado do Pará. **Ambiente & Sociedade**, v.24, 2021. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200167r1vu2021L3AO>.

SANTOS, M. R. S.; VITORINO, M. I.; PIMENTEL, M. A. S. Contribuição da precipitação na produção agropecuária no nordeste paraense: um estudo na Amazônia Brasileira. **Espacios**, v. 38, n. 23, 2017. <https://www.revistaespacios.com/a17v38n23/a17v38n23p01.pdf>.

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

SINGH, R. N. **Mango**. New Delhi: Indian Council of Agricultural Research, 1978.

SILVA, B.B. da; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado são Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. **Revista Caatinga**, v.24, n.3, 145 -152. 2011.

SILVA, B. B. D.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M. D.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.9, p.1218-1226, 2012.

SILVA, B. B. D.; MERCANTE, E.; BOAS, M. A. V.; WRUBLACK, S. C.; OLDONI, L. V. Estimativa da evapotranspiração real por satélite utilizando imagens Landsat 8 e modelo SEBAL. **Revista Ciência Agronômica**, v.49, n.2, p.221-227, 2018.

SILVA, C. de 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**, v. 15, n. 3, p. 425-468, 2021.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.

SILVA, R. S. B. D.; SOUSA, A. M. L. D.; SODRÉ, S. D. S. V.; VITORINO, M. I. Avaliação sazonal da qualidade das águas superficiais e subterrâneas na área de influência do Lixão de Salinópolis, PA. **Revista Ambiente & Água**, 13, n.2, 2018. <https://doi.org/10.4136/ambiente-agua.2072>.

SILVA, Ewelyn Regina Rocha. **Estimativa da evapotranspiração do açaí (*Euterpe oleracea*) irrigado, por meio do surface energy balance algorithm for land–SEBAL, no Leste da Amazônia**. Orientador: Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza. 2020. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém, PA, 2020.

SILVA, N. F.C.; NITSCHKE, P. R.; FERREIRA, L. G. B.; MARTELÃ³CIO, A. C.; CARAMORI, P. H.; ZACCHEO, P. V. C.; MARTINS, J. A. Agroclimatic risk zoning of mango (*Mangifera indica*) in the hydrographic basin of Paran River III, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v.16, n.7, p.983-991, 2020.

SILVA, R. S. B. D.; SOUSA, A. M. L. D.; SODRÉ, S. D. S. V.; VITORINO, M. I. Avaliação sazonal da qualidade das águas superficiais e subterrâneas na área de influência do Lixão de Salinópolis, PA. **Revista Ambiente & Água**, v.13, 2018. <https://doi.org/10.4136/ambiente-agua.2072>.

SILVA, L. D. B. da; LYRA, G. B., SILVA; J. B. G., DE PINHO; C. F., NASCENTES, A. L.; ALMEIDA, G. V.de; FOLEGATTI, M. V. Desempenho do método do balanço de energia-razão de Bowen na estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, v.21, n.3, p.516-516, 2016.

SILVEIRA, J. M. de C.; CANDIDO, B. M.; SILVA, A. L. B. de O.; PAVÃO, G. C. .; XAVIER, M. A. .; PIRES, R. C. de M. Uso de imagens multiespectrais e termográficas para monitoramento das condições hídricas da cana-de-açúcar. **Irriga**, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 689–696, 2020.

SOARES, Willames de Albuquerque. Análise Comparativa do Fluxo de Calor no Solo em Profundidade e na Superfície. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.06, n.04, p.665-679, 2013.

SOUZA, C. A.; DUARTE, L. F. A.; JOÃO, M. C.; PINHEIRO, M. A. Biodiversidade e conservação dos manguezais: importância bioecológica e econômica. *In*: SOUZA, Caroline A. *et al.* **Educação ambiental sobre manguezais**. São Vicente: UNESP, Instituto de Biociências, Câmpus do Litoral Paulista, 2018a. p. 16-56.

SOUZA, L. di; OLIVEIRA JALES, A. G. de. Impactos ambientais da fruticultura irrigada na comunidade de Pau Branco em Mossoró-RN. **Mercator-Revista de Geografia** da UFC, v. 4, n. 7, p. 75-82, 2005.

SOUZA, P. J. D. O. P. D.; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L. D.; SOUZA, E. B. D. Balanço de Energia Diurno em um Pomar de Mangueiras no Nordeste do Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.33, n.3, p. 537-546, 2018.

SOUZA FILHO, J. D. da C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, J. C. P. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Acta Amaz.** [online]. v.35, n.2, p.223-229, 2005.

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. **Rev. Bras. Meteorol.** v.33, n.3, p.537-546, 2018b.

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

SOUSA, A. M. L.de; SOUZA, P. J. O. P.DE; VITORINO, M. I. Avaliação do IAF para uso na estimativa de produtividade da manga: Estudo de caso em Cuiarana-Pará. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15., 2011, Curitiba, PR, Brasil, **Anais[...]**.Curitiba, PR, Brasil: INPE, 2011. <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/06.22.17.08/doc/p0327.pdf>.

SUN Z.; WEI B.; SU W.; SHEN, W.; WANG, C.; YOU, D.; LIU, Z. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. **Math Comput Model.** v.54, n.3-4, p.1086-1092, 2011.

TALSMA, C.J.; GOOD, S.P.; JIMENEZ, C.; MARTENS, B.; FISHER, J.B.; MIRALLES, D.G.; MCCABE, M.F.; PURDY, A.J. Partitioning of evapotranspiration in remote sensing-based models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.260-261, p.131-143, 2018.

TARTARI, Rodrigo et al. Análise de índices biofísicos a partir de imagens TM Landsat 5 em paisagem heterogênea no Sudoeste da Amazônia. **Rev. Ambient. Água** [online], v.10, n.4, p.943-953, 2015.

TAVARES, T.M., OLIVA, S.T., GUARÍN, R.R., and ARCINIEGAS, C.L.W. Mudanças climáticas e aspectos relacionados com o estado da Bahia. *In*: FERNANDES, R.C.P.; LIMA, M.A.G.; ARAÚJO, T.M. (comps.). **Tópicos em saúde, ambiente e trabalho: um olhar ampliado** [online]. Salvador: EDUFBA, 2014. p. 271-290.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat 8** Disponível em: <http://landsat.usgs.gov>. Acesso em: 29 mai. 2021.

VALADARES, Gabriele Moreira; LANDAU, Elena Charlotte. Evolução da produção de manga (*Mangifera indica*, Anacardiaceae). *In*: MOURA, L. *et al.* **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p.1011-1036.

VAN WITTENBERGHE, S.; ALONSO, L.; MALENOVSKÝ, Z.; MORENO, J. In vivo photoprotection mechanisms observed from leaf spectral absorbance changes showing VIS–NIR slow-induced conformational pigment bed changes. **Photosynthesis Research**, v.142, n.3, p.283-305, 2019.

VELOSO, G. A.; FERREIRA, M.E.; ROSA, R., DA SILVA, B.B. Determinação do albedo de superfície em áreas irrigadas do projeto Jaíba (Minas Gerais), mediante imagens Landsat 5 – TM. **Ra'eGa**, Curitiba, v. 35, p.126-146, 2015.

VIECCELLI, J. C.; SIQUEIRA, D. L. de.; BISPO, W. M. da S.; LEMOS, L. M. C. Characterization of leaves and fruits of mango (*Mangifera indica* L.) CV. IMBU. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.38, n.3, 2016. <https://doi.org/10.1590/0100-29452016193>.

VICENTE, M. R., LEITE, C. V., DOS SANTOS, R. M., LUCAS, P. O., DIAS, S. H. B., & SANTOS, J. A. Evapotranspiração de referência utilizando o método FAO Penman-Monteith com dados faltantes. **Global Science and Technology**, v.11, n.3, p.217-228, set/dez. 2018.

WOLFF, E. As águas na América Latina interpelam os credos por justiça socioambiental. **Caminhos de Diálogo**, v.9, n.15, 177–188, 2021.

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

YANG, P.; VAN DER TOL, C.; CAMPBELL, P.K.E.; MIDDLETON, E.M. Fluorescence Correction Vegetation Index (FCVI): A physically based reflectance index to separate physiological and non-physiological information in far-red sun-induced chlorophyll fluorescence. **Remote Sensing of Environment**, v.240, e111676, 2020.

ZANETTI, Juliete *et al.* Análise crítica da evolução do satélite landsat. **Anais do Seminário Científico do UNIFACIG**, n. 1, 2017. Não consegui incluir aqui o DOI do artigo, não pode ficar sem data ou coloca o DOI

ZUAZO, V. H. D.; RODRÍGUEZ PLEGUEZUELO, C. R.; GÁLVEZ RUIZ, B.; GUTIÉRREZ GORDILLO, S.; GARCÍA-TEJERO, I. F. Water use and fruit yield of mango (*Mangifera indica* L.) grown in a subtropical Mediterranean climate. **International Journal of Fruit Science**, v.19, n. 2, p.136-150, 2019.

## APÊNDICE A

**Quadro 1- Dados para obtenção da evapotranspiração diária de Penman-Monteith na área de estudo. Sítio experimental de Cuiarana, Salinópolis-PA.**

<b>Dia Juliano =</b>	<b>214</b>	<b>187</b>	<b>214</b>
<b>Imagem (data)</b>	<b>02/08/2015</b>	<b>06/07/2017</b>	<b>02/08/2021</b>
<b>Latitude (graus) =</b>	-0,663811111	-0,66381	-0,66381
<b>Tmax(oC) =</b>	30,49	31,37	30,06
<b>Tmin(oC) =</b>	21,04	22	24,84
<b>URmax (%) =</b>	100	94,6	95,2
<b>URmin (%) =</b>	70,7	56,24	81,2
<b>Veloc_vento =</b>	1,06	0,88	2,6938
<b>altura_vento =</b>	10	10	10
<b>Vento a 2m (m/s) =</b>	0,79282814	0,658197	2,014831
<b>Rad_solar (MJm-2) =</b>	25,73	20,62	25,24699
<b>Pressao_atm (KPa) =</b>	101,308	97,453	101,7208
<b>Parâmetros calculados</b>			
<b>Ta =</b>	25,765	26,685	27,45
<b>es(Tmin) =</b>	2,492837812	2,64362	3,137312
<b>es(Tmax) =</b>	4,363145189	4,587411	4,257071
<b>ea (Kpa) =</b>	2,78879073	2,540412	3,221732
<b>es (Kpa) =</b>	3,4279915	3,615516	3,697192
<b>Delta (Kpa/oC) =</b>	0,196305589	0,205816	0,214016
<b>Gama (Kpa/oC) =</b>	0,06736982	0,064806	0,067644
<b>Ângulo horário nascer Sol =</b>	1,567127474	1,56596	1,567127
<b>Declinação do Sol (rad)</b>	0,306667078	0,395436	0,306667
<b>dr =</b>	0,971733764	0,967099	0,971734
<b>Rad_solar TOA (MJm-2) =</b>	34,6168815	33,28763	34,61688
<b>Água precipitável (mm) =</b>	41,65375358	36,75991	47,98041
<b>Rad_solar céu claro =</b>	27,1410338	26,33748	27,11414
<b>Duração do dia N(hs) =</b>	11,97198214	11,96306	11,97198
<b>Saldo de onda curta Rns =</b>	19,8121	15,8774	19,44018
<b>Saldo de onda longa Rnl =</b>	3,87117782	3,278439	3,222687
<b>ETo (diária) FAO-56 =</b>	4,8950	4,1948	4,9091