



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - DECA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VICTOR EMANNUEL SANTOS DE ARAÚJO

**ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM SENSORIAMENTO REMOTO
SUBORBITAL E MICROMETEOROLOGIA EM CULTURA DE CANA-DE-
AÇÚCAR NO LITORAL DO ESTADO DA PARAÍBA**

JOÃO PESSOA - PB

Maior, 2025

VICTOR EMANNUEL SANTOS DE ARAÚJO

**ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM SENSORIAMENTO
REMOTO SUBORBITAL E MICROMETEOROLOGIA EM CULTURA DE CANA-
DE-AÇÚCAR NO LITORAL DO ESTADO DA PARAÍBA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Coordenação do Curso de Engenharia
Ambiental da Universidade Federal da
Paraíba – Campus I – para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Davi de Carvalho
Diniz Melo.

JOÃO PESSOA - PB

Maior, 2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A663e Araujo, Victor Emmanuel Santos de.

Estimativa de evapotranspiração com sensoriamento remoto suborbital e micrometeorologia em cultura de cana-de-açúcar no litoral do estado da Paraíba / Victor Emmanuel Santos de Araujo. - João Pessoa, 2025.
42 f. : il.

Orientação: Davi de Carvalho Diniz Melo.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Evapotranspiração. 2. Sensoriamento remoto. 3. Modelo PT-JPL. I. Melo, Davi de Carvalho Diniz. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

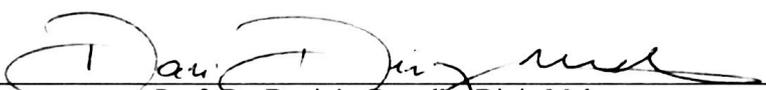
CDU 504(043.2)

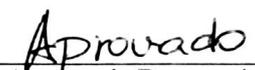
FOLHA DE APROVAÇÃO

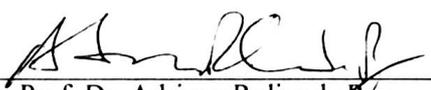
VICTOR EMANNUEL SANTOS DE ARAÚJO

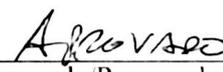
ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM SENSORIAMENTO REMOTO SUBORBITAL E MICROMETEOROLOGIA EM CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR NO LITORAL DO ESTADO DA PARAÍBA

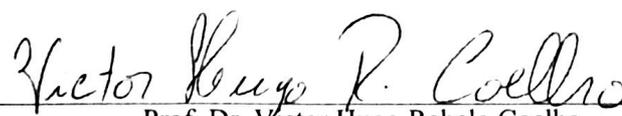
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 05/05/2025 perante a seguinte Comissão Julgadora:

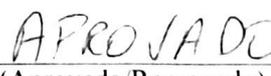

Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB


(Aprovado/Reprovado)


Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB


(Aprovado/Reprovado)


Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho
Departamento de Geociências do CCEN/UFPB


(Aprovado/Reprovado)

Profa. Aline Flávia Nunes Remígio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, meus pais *Elaine Cristine* e *Eromar Batista*, ao meu irmão *Luis Eduardo*, e minha segunda mãe *Maria Gorette*, por sempre me apoiar e ajudar nessa jornada que foi a graduação em outra cidade, outro estado.

Aos amigos de escola, *Lucas Donizet* e *Lucas Freitas*, que me acompanharam de Caicó até João Pessoa para dividir uma moradia, por compartilhar dos momentos e aprendizados que foram começar uma faculdade e morar longe de casa.

Ao meu orientador *Davi Melo*, por me instruir, motivar, ajudar e contribuir no meu aprendizado durante os projetos que participamos. Como também os muitos outros professores os quais eu passei pela graduação, que participaram na minha formação.

E claro, aos amigos que fiz na faculdade por dividirem da história que passamos desde 2018, em especial minha turma *Andreza Alves*, *Ana Júlia*, *Camilla Lima*, *Eduardo Abath*, *Gabriel Lira*, *Hannah Beatriz*, *Jailson Andrade*, *Jeová Mesquita*, *Khalil Grisi*, *Maria Luiza*, *Natália Maria* e *Sara Ribeiro*, além de todas as outras pessoas que conheci de outras turmas e cursos.

RESUMO

Entender o processo da evapotranspiração (ET) e seu papel no balanço hídrico é de grande importância para um manejo agrícola eficiente. Diante das necessidades de técnicas para sua medição, o uso de métodos indiretos com o apoio do sensoriamento remoto se consolidou como uma das abordagens mais eficazes e mais utilizadas. Devido à maior versatilidade de operação em relação aos satélites, as aeronaves remotamente pilotadas (ARP) vem sendo cada vez mais usadas na área. Neste estudo, foi então utilizado o método *Priestley-Taylor Jet Propulsion Lab* para estimar a ET diária em uma cultura de cana-de-açúcar localizada no litoral da Paraíba. Para isso, foram usados no modelo ortomosaicos obtidos com a ARP *Phantom 4 Multispectral* e dados micrometeorológicos registrados em uma torre de fluxo. Também foi realizada uma análise espacial dos resultados na área de influência da torre para confirmar a representatividade dos dados. As estimativas de ET diária pelo modelo PT-JPL apresentaram boa correlação com a série observada, atingindo um R^2 de 0,81. Além disso, foi confirmada a homogeneidade da área pela semelhança das estatísticas da pegada de influência com a área total. Os resultados indicaram que o método empregado e suas adaptações foram adequados para monitoramento de cana e foi capaz de expressar bem o comportamento de ET ao longo do ciclo da cana para toda a área.

Palavras-chave: Evapotranspiração; Sensoriamento remoto; Modelo PT-JPL.

ABSTRACT

Understanding the process of evapotranspiration (ET) and its role in the water balance is highly important for efficient agricultural management. Given the need for measurement techniques, the use of indirect methods supported by remote sensing has been consolidated as one of the most effective and widely used approaches. Due to their greater operational versatility compared to satellites, remotely piloted aircraft (RPA) have been increasingly used in this field. In this study, the Priestley-Taylor Jet Propulsion Lab (PT-JPL) method was applied to estimate daily ET in a sugarcane crop located on the coast of Paraíba. For this purpose, the model used orthomosaics obtained from a Phantom 4 Multispectral RPA and micrometeorological data collected from a flux tower. A spatial analysis of the results was also carried out over the tower's footprint area to confirm the representativeness of the data. The daily ET estimates generated by the PT-JPL model showed good correlation with the observed series, reaching an R^2 of 0.81. Furthermore, the homogeneity of the area was confirmed by the similarity between the footprint statistics and those of the entire area. The results indicated that the method used and its adaptations were suitable for monitoring sugarcane and effectively represented the ET behavior throughout the crop cycle across the entire area.

Keywords: Evapotranspiration; Remote sensing; PT-JPL model.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS.....	9
2.1. OBJETIVO GERAL.....	9
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
3.1. EVAPOTRANSPIRAÇÃO	9
3.2. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE ET.....	10
3.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A ET.....	11
3.4. ÁREA DE INFLUÊNCIA DA TORRE	12
3.5. SENSORIAMENTO REMOTO (SR).....	12
3.5.1. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO.....	13
3.5.2. SR SUBORBITAL	13
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
4.1. ÁREA DE ESTUDO	14
4.2. DADOS MICROMETEOROLÓGICOS	16
4.3. IMAGEAMENTO E PROCESSAMENTO	17
4.4. MÉTODO PRIESTLEY-TAYLOR JET PROPULSION LAB (PT-JPL)	20
4.5. VALIDAÇÃO DO MODELO	21
4.6. ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DA TORRE DE FLUXO	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1. DADOS DE CAMPO.....	22
5.2. ESTATÍSTICAS ZONAIIS.....	23
5.2.1. NDVI.....	23
5.2.2. ET.....	25
5.3. EVOLUÇÃO DA ESTIMATIVA DE ET.....	26

5.4. COMPARAÇÃO COM A SÉRIE OBSERVADA	26
5.5. ANÁLISE DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA	28
6. CONCLUSÕES	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
APÊNDICE A - Ortomosaicos de NDVI	35
APÊNDICE B - Mapas de ET diária, ano de 2022	36
APÊNDICE C - Mapas de ET diária, ano de 2023	37
APÊNDICE D – Estatísticas zonais de NDVI	38
APÊNDICE E – Estatísticas zonais de ET (mm/dia).....	39
APÊNDICE F – Comparação de estatísticas Área Total x FFP (mm/dia).....	40

1. INTRODUÇÃO

A gestão adequada de recursos hídricos é um desafio enfrentado pela humanidade há um longo tempo, com estratégias e tecnologias evoluindo com sucesso ao passar das décadas. Entender o funcionamento do ciclo hidrológico e suas componentes foi essencial para esses avanços (Schultz e Uhlenbrook, 2008). Das componentes, destaca-se a evapotranspiração (ET), responsável pela principal parcela de saída da água no balanço hídrico (Araújo; Costa; Santos, 2007).

Por representar a perda de água na superfície para a atmosfera, a ET possui uma maior relevância na agricultura. O seu monitoramento permite, entre muitos benefícios, determinar a demanda hídrica de uma cultura, auxiliando assim no planejamento do plantio e da colheita (Bragança et al., 2010).

No entanto, existem dificuldades em se mensurar diretamente a ET, pois os equipamentos são custosos e sensíveis, requerendo parâmetros físicos medidos precisamente e uma operação complexa. Por outro lado, métodos indiretos também são utilizados, como equações empíricas, modelos matemáticos ou estimativas através do balanço de energia, também não isentos de obstáculos como resultados tendenciosos (Allen et al., 1998, 2011).

Entre esses, os métodos indiretos que usam do sensoriamento remoto (SR) são os que apresentam maior potencial no manejo mais preciso da agricultura, devido a grande quantidade de informação que pode ser obtida por área (Molin et al., 2015). Atualmente, uma ferramenta que vem ganhando destaque neste campo são as aeronaves remotamente pilotadas (ARP) equipadas com sensores multiespectrais, uma alternativa mais versátil e de melhor custo-benefício, superando limitações encontradas nos produtos de satélite, como a necessidade de céu sem nuvens e tempos de revisita restritos (Rodrigues e Barros, 2019).

Dessa maneira, o presente estudo utilizou um método indireto de ET, o modelo adaptado Priestley-Taylor Jet Propulsion Lab (PT-JPL), para estimar a ET diária em uma cultura de cana-de-açúcar no litoral da Paraíba, realizando-se em seguida uma validação das estimativas.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Adaptar o modelo Priestley-Taylor Jet Propulsion Lab (PT-JPL) para estimar ET, em altíssima resolução espacial, de uma cultura agrícola, a partir de dados de sensoriamento obtidos por aeronave remotamente pilotada (ARP) e micrometeorologia.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ajustar os parâmetros e entradas do modelo PT-JPL para compatibilizá-lo com dados de sensoriamento remoto adquiridos por aeronave remotamente pilotada (ARP);
- Validar as estimativas de evapotranspiração obtidas com o modelo adaptado por meio da comparação com dados micrometeorológicos obtidos em campo;
- Avaliar o desempenho do modelo adaptado na geração de mapas de evapotranspiração em altíssima resolução espacial para uma cultura agrícola específica.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração (ET) é definida como a junção de dois processos do ciclo hidrológico, a evaporação da água da superfície e a transpiração da vegetação, responsáveis pela saída da massa de água presente no solo de volta à atmosfera. Processo esse que é fundamental para a ciclagem do balanço hídrico de uma região (Allen et al., 1998; Lins et al., 2021).

Ainda de acordo com Allen et al. (1998), a ET é comumente expressa em uma quantidade de água perdida pela superfície, portanto milímetros de água (mm) por unidade de tempo. Essa quantia pode ser compreendida também como a porção de água vaporizada por uma taxa de energia incidente na área, permitindo que a ET seja também representada como um fluxo de energia por área, ou fluxo de calor latente ($LE = [W/m^2]$).

Levando em consideração que o calor latente de evaporação (λ) da água é 2,45 MJ/kg, e 1 mm pode ser entendido como 0,001 m³ de água em 1 m², portanto 1 kg de água em 1 m², o processo de conversão de unidades para o tempo de 1 dia (86400 s) pode ser descrito pelo seguinte cálculo (1):

$$ET = \frac{LE * \Delta t}{\lambda} = \frac{LE [W/m^2] * 86400 [s]}{2,45 [MJ/kg]}$$

$$ET = \frac{LE [J/s.m^2] * 86400 [s]}{2,45 * 10^6 [J/kg]} = \frac{LE [J] * 86400 [s] [kg]}{2,45 * 10^6 [J] [s.m^2]}$$

$$ET = LE * 0,03526 [mm] \quad (1)$$

Essa notação é normalmente usada para a ET quando descrita na equação do balanço de energia de uma região. O balanço é descrito pela equação (2), uma operação simples entre fluxos de energia, sendo R_n a radiação líquida, G o fluxo de calor no solo e H o fluxo de calor sensível (Bastiaanssen et al., 1998).

$$LE = R_n - G - H [W/m^2] \quad (2)$$

Compreender o funcionamento e quantificar esses processos possibilita uma gestão de recursos hídricos bem mais eficiente, fornecendo dados de quanta água está sendo produzida ou consumida. Devido a esses fatores, práticas como a agricultura fazem um grande uso do monitoramento da ET, permitindo programar os ciclos de irrigação, acompanhar o crescimento das culturas e calcular níveis de produtividade (Teixeira et al., 2009; Zhang et al., 2021).

As maneiras de realizar tais medições são separadas em leituras diretas em campo com o uso de lisímetros, embora mais difíceis de se obter, ou de forma indireta através de modelos matemáticos, equações elaboradas empiricamente e relações micrometeorológicas, sendo as formas indiretas preferíveis devido sua praticidade (Allen et al., 2011; Lins et al., 2021).

3.2. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE ET

Como apontado por Fisher et al. (2008) e também por Santos (2023), os métodos para se estimar indiretamente a ET são múltiplos em literatura, entre os mais utilizados e adaptados estão os de Thornthwaite (1948), Penman-Monteith (1965) e Priestley-Taylor (1972). Além destes, muitos outros estudos atestam a eficácia desses e outros modelos através de comparações entre seus resultados (Doorenbos e Pruitt, 1996; Araújo; Costa; Santos, 2007; Borges Júnior et al., 2012; Cunha et al., 2013).

Um destes métodos, a adaptação Penman-Monteith FAO56 (1998), é tido como referência e é uma sugestão comum para estimativas de ET, porém ele requer de uma grande quantidade de parâmetros como umidade relativa, radiação solar e muitos dados de temperatura,

que carecem de disponibilidade em longos períodos, como apontado por Cunha et al. (2013) e Islam e Alam (2021).

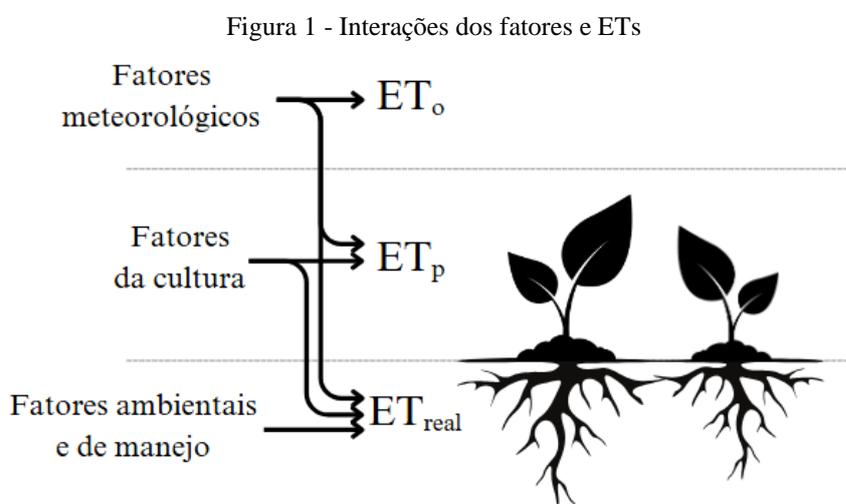
É trazido também por Melo et al. (2021) que sistemas baseados no método de covariância de vórtices turbulentos, ou *Eddy Covariance*, compõem o panorama atual das técnicas para estimar os fluxos de massas e energias de superfície.

No entanto, esses métodos clássicos e suas derivações têm como resultado comum uma ET de referência (ET_o), definida pela taxa de ET em uma cultura imaginária ideal, sem contenções hídricas e em estágio de crescimento. A ET_o passa ainda por um coeficiente específico da cultura para poder então expressar uma ET potencial (ET_p) (Allen et al., 1998; Borges Júnior et al., 2012).

Segundo Camargo e Camargo (2000), a ET_p caracteriza a saída de água como uma demanda hídrica da cultura, ou seja, o quanto seria necessário de chuva para manter o equilíbrio hídrico. A partir então da ET_p são adotados fatores limitantes de forma a estimar a ET real (ET_{real}) da vegetação considerando condições não ideais de tempo e da cultura.

3.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A ET

A ET em geral, e suas diferentes classes, são afetadas diretamente por diversos parâmetros ambientais e de cultura (Figura 1), variando-se sua influência a depender do tipo abordado.



Fonte: Adaptado de Allen et al. (1998)

Temperatura, radiação, umidade e velocidade dos ventos, compõem os fatores de maior influência, tendo em conta que são usados como base para os diversos métodos de estimativa de ET_o . Os aspectos da vegetação, como estágio de crescimento e cobertura do solo, são

adicionados então ao tratar de culturas específicas e homogêneas, estabelecendo valores de ET_p . Naturalmente, adotando todos os parâmetros é formada a ET_{real} que pode ser altamente afetada pelas condições do solo e pelas práticas de irrigação da cultura (Allen et al., 1998).

3.4. ÁREA DE INFLUÊNCIA DA TORRE

As estações onde são realizadas as leituras micrometeorológicas, normalmente chamadas de torres de fluxo, realizam medições influenciadas pelas interações que ocorrem na superfície. Esse campo de interações, definido como pegada de influência ou *Flux Footprint* (FFP), mensura a extensão das contribuições de uma cultura para os dados coletados pelos sensores (Vesala et al., 2008).

Denominadas funções de *footprint*, as técnicas que calculam essas áreas de contribuição atuam dentro da camada limite dos ventos na área de interesse, e funcionam como identificadores do fluxo vertical que interagiu com a vegetação. Dessa forma, funções de *footprint* dependem diretamente de características precisas das medições dos ventos, como também alturas da cultura e dos sensores usados (Kljun, Rotach, Schmid, 2002).

Como apontado por Chu et al. (2021), FFPs são normalmente desconsiderados em estudos devido a premissa de áreas homogêneas e de não haver uma necessidade de sua produção. Eles, no entanto, ainda possuem uma grande capacidade espaço-temporal de reconhecer o funcionamento das interações da área monitorada e suas leituras.

3.5. SENSORIAMENTO REMOTO (SR)

Atualmente, as técnicas de SR já são amplamente abordadas em diversos estudos e aplicações: avaliação de riscos, estudos de uso e ocupação do solo, planejamento urbano, entre outros, todos utilizando diferentes produtos com o passar do tempo (Coelho e Correa, 2013). Contando com satélites, aviões e mais recentemente aeronaves não-tripuladas, o SR se tornou uma ferramenta eficiente e sustentável na coleta de informações e análises do ambiente (Sousa, 2017; Rodrigues e Barros, 2019).

Dentre as aplicações, novamente são destacadas as atividades agrícolas, que segundo Formaggio e Sanches (2017) obtém mais benefícios ao usar o SR para monitoramento, visto a necessidade de se considerar aspectos singulares do ambiente como tipos de solo e mudanças climáticas. Molin et al. (2015) reforçam essa ideia em específico para a agricultura de precisão (AP), constatando a habilidade de mapear as informações da superfície de maneira mais detalhada, gerando resultados mais fidedignos.

Nesse contexto, o uso de modelos de ET que fazem uso desses dados de SR mapeados vêm ganhando destaque sobre métodos micrometeorológicos e medições diretas, pois possuem a qualidade de permitir que suas estimativas sejam analisadas em uma escala espaço-temporal, favorecendo estudos em áreas maiores e mais diversificadas (Bezerra et al., 2008; Teixeira et al., 2009; Lins et al., 2021). Um exemplo é o estudo de Araújo et al. (2017) em que conseguiram abordar a ET em toda a região Nordeste do Brasil usando produtos Terra/MODIS no algoritmo R-SSEB.

Como apontado por Santos (2023) a modelagem da ET possui diferentes abordagens com sucesso em literatura, com estimativas empíricas usando produtos de índices de vegetação, como também modelagem físicas usando faixas do visível, infravermelho e ondas termiais.

3.5.1. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

Um dos indicadores mais utilizados nessa área da AP é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, ou *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), obtido através de uma operação entre as bandas do vermelho (RED) e infravermelho próximo (NIR) (3). O NDVI retorna valores entre -1 e 1, quantificando o vigor da vegetação: quanto mais próximo de 1, mais saudável, enquanto valores negativos ou próximos a 0 representam solo exposto ou corpos hídricos.

$$NDVI = \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{RED}}{\lambda_{NIR} + \lambda_{RED}} \quad (3)$$

A razão do uso deste índice está em sua facilidade de análise e execução, como também em sua capacidade de distinguir aspectos do comportamento fisiológico da planta (Alface et al., 2019).

3.5.2. SR SUBORBITAL

Definidas por operarem abaixo da órbita, as ferramentas de SR suborbital são exemplificadas por equipamentos como aviões, balões ou veículos aéreos não tripulados que contornam os obstáculos encontrados em satélites como a cobertura de nuvens em áreas de interesse, tempos de revisita inflexíveis e resolução espacial limitada (Formaggio e Sanches, 2017; Ahmad et al., 2020).

Segundo Sousa (2017), essas tecnologias vêm ganhando foco e inovação, principalmente no ramo da AP, fomentando novas tendências em razão de suas vantagens. Seu

destaque se dá devido seu custo-benefício de obtenção imediata de informações, pois são equipadas com câmeras de alta resolução espacial e tipos diversos de sensores:

- Sensores no espectro visível: Monitoramento visual de atividades;
- Infravermelhos: Identificam fatores de biomassa e estresse hídrico;
- Multiespectrais: Constatam aspectos da vegetação e do solo;
- LiDAR: Sensor de mapeamento de ambientes.

Tais informações adquiridas são indispensáveis para alguns tipos de modelos de ET, fazendo parte dos seus dados de entrada principais.

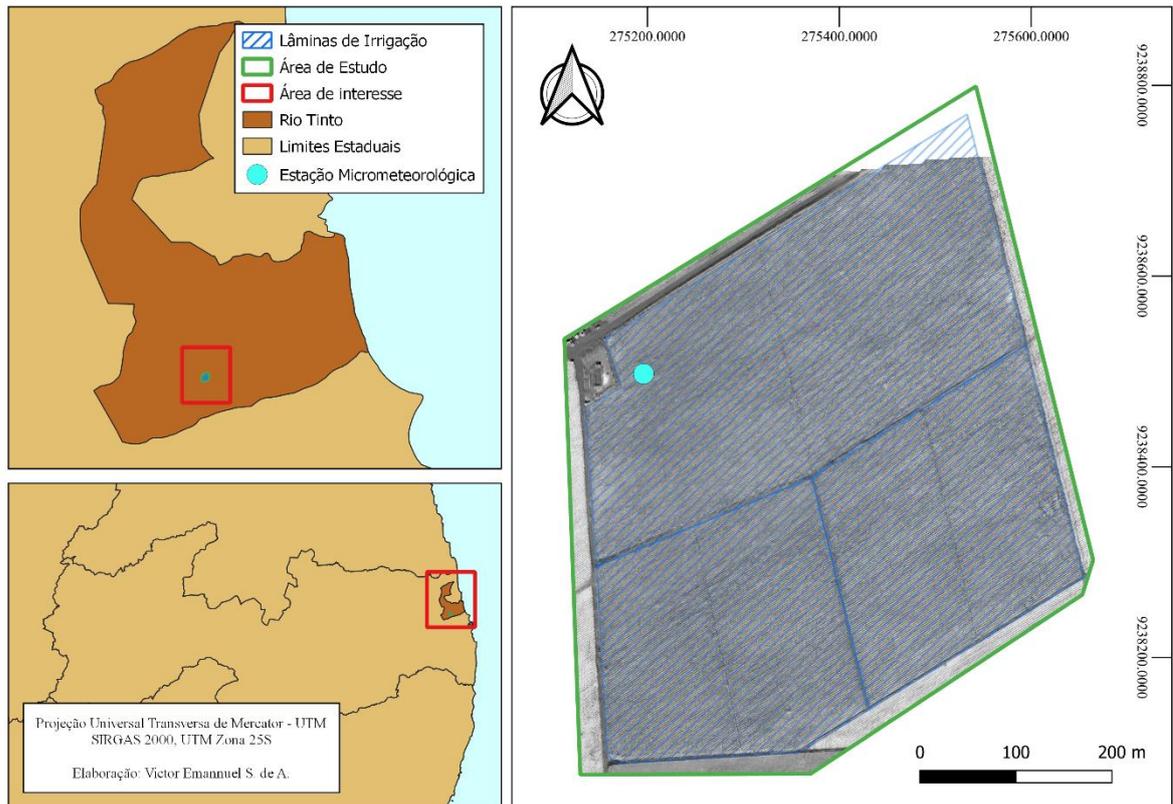
As aeronaves remotamente pilotadas (ARP), ou também chamados drones, são uma das ferramentas suborbitais em foco atual no mercado pelas vantagens já citadas, como também sua simplicidade de operação. Sendo equipamentos de fácil locomoção e operando com voos automatizados, as ARPs mesmo cobrindo um menor espaço que um imageado por satélite, ainda é uma ferramenta útil e flexível (Rodrigues e Barros, 2019).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDO

A área onde o trabalho foi desenvolvido é uma cultura de cana-de-açúcar localizada no município de Rio Tinto, no litoral do estado da Paraíba (Figura 2). O local delimitado é irrigado por gotejamento dividido em três talhões referentes a sua aplicação mensal: 80, 60 e 40 mm. Respectivamente as áreas de cada talhão são em quilômetros quadrados: 0,111 km², 0,062 km² e 0,061 km², a área total possuindo, portanto, cerca de 0,234 km².

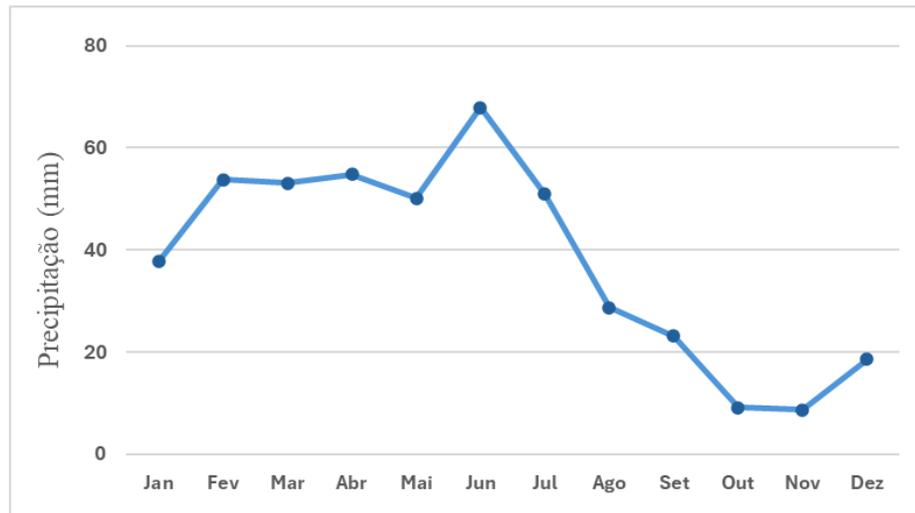
Figura 2 - Localização da área de estudo



Fonte: Autoria própria (2025)

Segundo a classificação de Köppen, esta região é do tipo As', Clima Tropical Chuvoso, caracterizado como quente e úmido, apresentando chuvas durante o outono e inverno. As chuvas dão início no litoral do estado durante o mês de março e alcançam maior intensidade e duração nos meses de junho e julho (Chaves, Francisco e Macêdo, 2021). O comportamento das médias mensais do município de Rio Tinto segue esse padrão, como pode ser observado na Figura 3, construída a partir dos dados de precipitação mensal dos anos de 2000 até o momento desse estudo, disponibilizados pela Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba (AESAs).

Figura 3 - Médias mensais de precipitação do município de Rio Tinto (2000 - 2025)



Fonte: A autoria própria (2025)

As temperaturas médias mensais da região seguem um padrão semelhante, sendo junho, julho e agosto os meses menos quentes, enquanto outubro, novembro e dezembro são os meses com temperaturas mais elevadas, (Medeiros et al., 2015).

4.2. DADOS MICROMETEOROLÓGICOS

A área conta com uma estação de micrometeorologia (Figura 4), instalada próxima a borda da área como indicado na Figura 2, equipada com múltiplos sensores:

- Anemômetro Sônico: sensor que registra a velocidade, direções e temperatura do vento em alta frequência.
- Fluxímetro: sensor instalado imediatamente abaixo da superfície para medir o fluxo de calor no solo.
- Saldo Radiômetro: sensor que mede a radiação líquida.
- Termo-higrômetro: sensor para registrar a temperatura e umidade relativa do ar.
- Termopar Ultrafino Tipo E: sensor para medir temperatura do ar em alta frequência.

Figura 4 - Torre de fluxo



Fonte: Autoria própria (2025)

Com exceção dos sensores de alta-frequência (anemômetro e termopar tipo E) que realizaram leituras a cada décimo de segundo, os demais sensores foram configurados para realizar médias das leituras a cada 30 minutos, sendo estas calculadas e armazenadas pelos dataloggers presentes na torre. Desses arquivos, foram feitas médias diárias considerando apenas os dias que possuíam pelo menos 80% dos dados como significativos (Melo et al., 2021), elas foram usadas no modelo e nos cálculos do balanço de energia feitos para validar as estimativas.

Para este estudo, foi levantada uma série compreendendo o período de 24 de setembro de 2022 a 25 de agosto de 2023, contabilizando um total de 336 dias. A maioria das falhas foram preenchidas ao unir as séries de variáveis que eram medidas por mais de um sensor, restando 62 dias com alguma falha.

4.3. IMAGEAMENTO E PROCESSAMENTO

A área e seus arredores foram imageados utilizando a ARP Phantom 4 Multispectral, um modelo equipado de seis sensores CMOS 1/2.9", um para imagens RGB e cinco multiespectrais para bandas monocromáticas, sendo elas o espectro visível (bandas do azul, verde e vermelho), borda vermelha e infravermelho próximo.

Os levantamentos foram planejados usando o programa DJI GS Pro, tomando como altitude de voo uma altura de 120 m e recobrimentos lateral e frontal de 75%. Foram realizados voos em onze datas abrangendo um período entre os anos de 2022 e 2023.

Conjuntamente aos voos exibidos na Tabela 1, foram também realizadas leituras da altura da cana. As medições correspondem à média de 3 alturas aferidas, uma para cada lâmina de irrigação.

Tabela 1 - Datas das imagens; Dias de registro de altura da cana indicados por asterisco (*)

Ano	2022	2023
	7 de outubro *	1 de fevereiro
	17 de outubro	24 de fevereiro *
	4 de novembro *	24 de março *
Data	25 de novembro	28 de abril *
	22 de dezembro *	12 de maio *
		26 de maio *

Fonte: Autoria própria (2025)

Para a execução dos voos, foram estabelecidos cinco pontos de controle, cujas coordenadas foram obtidas usando um GPS de precisão, para que pudessem ser usados posteriormente na correção geométrica e ortorretificação das imagens (Figura 5).

Figura 5 - Pontos de controle



Fonte: Adaptado de Silva (2023)

O processamento foi realizado por meio do software Pix4DMapper, onde foram também inseridas as informações do voo e dos sensores. Ao serem importados, os pontos de controle permitiram a junção e ortorretificação das cenas imageadas. Em sequência, o programa gera então uma nuvem de pontos em malha, e a partir dele um modelo digital de superfície, um ortomosaico e possibilita o cálculo de índices destes produtos, sendo usado para esse estudo o NDVI.

Após isso, foram usados para subsequentes manipulações das imagens os softwares QGIS 3.18 e Octave 9.3.0. A fim de padronizar os dados de entrada, foi feito um recorte das imagens usando um *shapefile* da área, e para cada seção foram calculadas as seguintes estatísticas zonais para os NDVIs e Ets estimadas: média, desvio padrão (σ), valores máximos e mínimos.

Além disso, para otimizar o processamento, as imagens passaram por uma degradação feita através de uma média dos valores em blocos de 4x4, com o resultado sendo atribuído a um único pixel. Levou-se em consideração o fato que os ortomosaicos originais possuem uma alta resolução espacial, cerca de 0,07 m no original e 0,30 m no degradado como verificado através do QGIS, e não haveria perda significativa de dados.

4.4. MÉTODO PRIESTLEY-TAYLOR JET PROPULSION LAB (PT-JPL)

O modelo usado para estimar a ET foi o PT-JPL, adaptado por Fisher et al. (2008), que considera a soma de três componentes: transpiração da planta (LE_c), evaporação do solo (LE_s) e evaporação da água interceptada no dossel (LE_i). Cada uma dessas componentes tem como base o cálculo de ET_p de Priestley e Taylor.

São necessários cinco dados principais de entrada: radiação líquida, temperatura máxima do ar, pressão de vapor da água, NDVI e o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI). Neste estudo, a entrada de NDVI foi adaptada para ser calculada espacialmente usando os ortomosaicos adquirido através do imageamento. Além desses, foi usado também o fluxo de calor no solo (G). Também, foi usado para calcular o SAVI, necessário para os parâmetros de entrada, a equação a seguir descrita por Ershadi et al. (2014) (4).

$$SAVI = 0.45 * NDVI + 0.132 \quad (4)$$

Para converter a ET_p em ET efetiva, utilizam-se de condições e restrições ecofisiológicas derivadas de informações do solo e da vegetação. Todos os parâmetros e restrições, bem como as expressões para cada componente, estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do modelo PT-JPL

Parâmetros	Títulos	Equações
LE_c	Transpiração da planta	$(1 - f_{wet})f_g f_T f_M \alpha \frac{\Delta}{\Delta - \gamma} R_{nc}$
LE_s	Evaporação do solo	$(f_{wet} + f_{SM}(1 - f_{wet}))\alpha \frac{\Delta}{\Delta - \gamma} (R_{ns} - G)$
LE_i	Evaporação da água interceptada	$f_{wet}\alpha \frac{\Delta}{\Delta - \gamma} R_{nc}$
f_{wet}	Umidade relativa da superfície	RH^4
f_g	Fração de copa verde	$\frac{f_{APAR}}{f_{iPAR}}$
f_T	Restrição de temperatura da planta	$exp(-(\frac{T_{max} - T_{opt}}{T_{opt}})^2)$
f_M	Restrição de umidade da planta	$\frac{f_{APAR}}{f_{APARmax}}$

f_{SM}	Restrição de umidade do solo	RH^{VPD}
f_{APAR}	Fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cobertura verde de vegetação	$1.3632 * SAVI - 0.048$
f_{iPAR}	Fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cobertura total de vegetação	$NDVI - 0.05$
R_{ns}	Radiação líquida do solo	$R_n \exp(-0.6 * LAI)$
R_{nc}	Radiação líquida do dossel	$R_n - R_{ns}$
LAI	Índice de área foliar	$-\frac{\ln(1 - f_{iPAR})}{0.5}$
T_{opt}	Temperatura ótima para o crescimento da planta	T_{max} para o máximo de $\frac{R_n * T * SAVI}{VPD}$

Fonte: Adaptado de Fisher et al. (2008)

Sendo α a constante de Priestley e Taylor e igual a 1,26 C°/kPa, Δ a inclinação da curva de saturação da pressão de vapor, γ a constante psicrométrica e igual a 0,66 C°/kPa, e VPD o déficit de pressão de vapor. Por fim, o modelo retorna a LE espacializada em W/m² que foi convertida para milímetros por dia (mm/dia) como explicado na Equação 1.

Devido a quantidade limitada de amostras, foi adotada uma janela de ± 1 dia, um dia antes e depois, para cada ortomosaico com o objetivo de obter estimativas para mais dias com menos imagens. Para isso foi tomada a hipótese de que não há uma variação natural significativa do NDVI para um intervalo de tempo curto de poucos dias, permitindo assim obter resultados representando três dias para cada imagem.

4.5. VALIDAÇÃO DO MODELO

Para atestar a capacidade de estimativa do PT-JPL adaptado, foram utilizadas métricas clássicas de validação: o erro absoluto médio (EAM), a raiz do erro médio quadrático (RMSE) e o coeficiente de determinação de correlação (R^2).

Para as métricas, foram usados apenas os valores médios da área total para ET estimada (ET_e) e os valores correspondentes da ET observada (ET_{obs}), sendo essa a ET calculada pelo balanço de energia através das medições da torre. O EAM foi calculado através da equação (5), o RMSE pela equação (6) e o R^2 pela equação (7).

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |ETe - ETobs| \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ETe - ETobs)^2} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ETe - ETobs)^2}{\sum_{i=1}^n (ETobs - ETobs)^2} \quad (7)$$

4.6. ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DA TORRE DE FLUXO

Usando uma ferramenta online elaborada por Kljun et al. (2015), foram geradas estimativas da pegada de fluxo, ou *Flux Footprint* (FFP), que correspondem à extensão espacial da área que contribui para as medidas na torre de fluxo.

O modelo tem como parâmetros de entrada dados de vento, como direção, velocidade média e desvio padrão, e informações sobre o dossel da vegetação local, como a altura de deslocamento e comprimento de rugosidade.

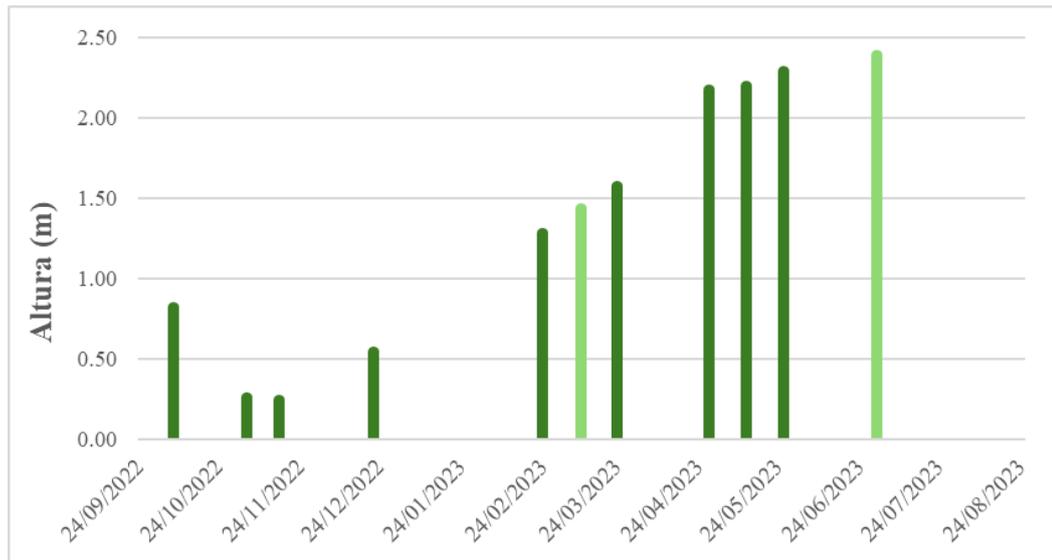
Os resultados da ferramenta são arquivos contendo coordenadas bidimensionais para os valores da função da pegada, estes arquivos foram convertidos em rasters e então para polígonos, de modo a criar contornos de uma área equivalente a 85% a 90% da contribuição para torre. Neste estudo foram usados FFPs que coincidem com as datas dos ortomosaicos, portanto coincidindo com as estimativas de ET geradas pelo PT-JPL.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. DADOS DE CAMPO

As medidas de altura da cana foram monitoradas no período entre 07 de outubro de 2022 até 30 de junho de 2023, englobando cerca de 8 meses do ciclo da cultura, iniciando-se no mês de novembro. Além das leituras feitas em conjunto dos dias de voo, foram feitas também medições em datas intermediárias, podendo assim compor um perfil mais completo de crescimento apresentado na Figura 6, com os dias de voo destacados com verde escuro.

Figura 6 - Altura da cana-de-açúcar ao longo do tempo



A menor das leituras foi de 0,25 m em 16 de novembro, e a maior leitura foi 2,39 m, em 30 de junho. Foi observado que o crescimento da cultura se iniciou no final de 2022 e persistiu durante o primeiro trimestre do ano seguinte, após isso o crescimento da cana estabilizou.

5.2. ESTATÍSTICAS ZONAIS

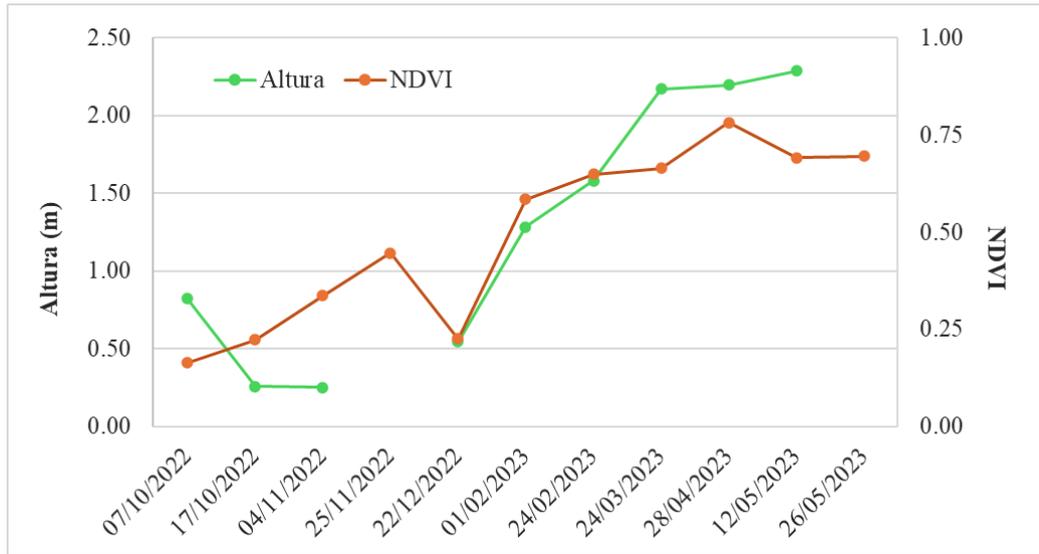
Os dados apresentados a seguir são referentes às imagens de NDVI (Apêndice A) e aos mapas de ET gerados para as áreas (Apêndices B; C).

5.2.1. NDVI

Foram geradas as estatísticas zonais de cada uma das datas, para as três seções de irrigação, como também para a área como um todo, dispostas separadamente para 2022 e 2023 no Apêndice D.

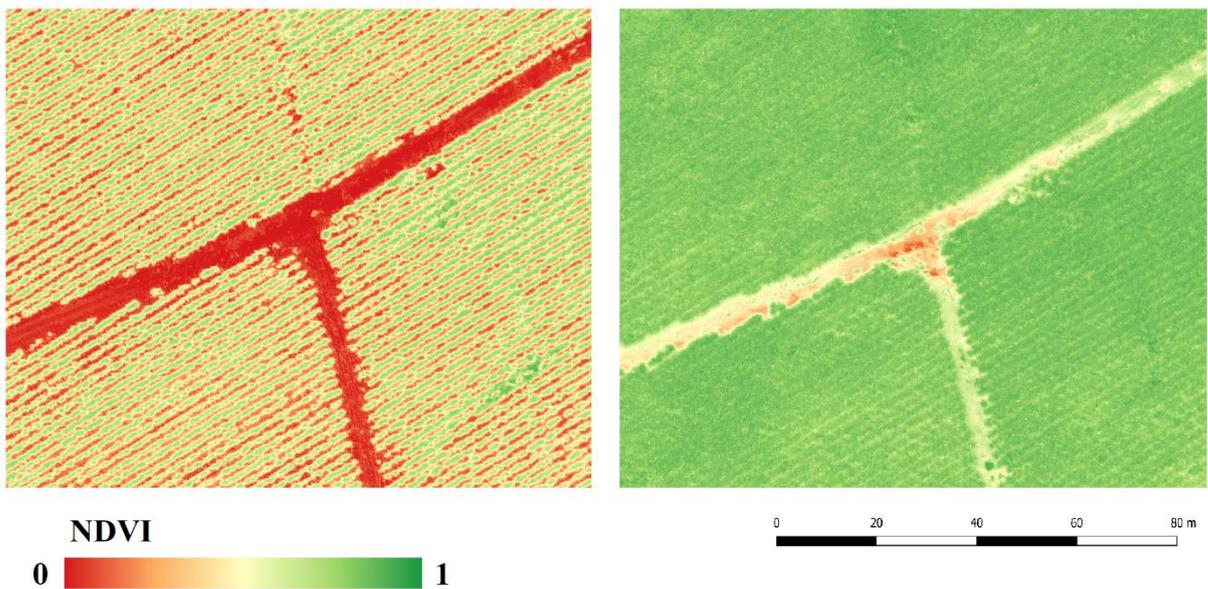
O índice médio da área total, apresentou comportamento similar ao padrão de crescimento da cana, aumentando em valor com o passar do tempo (Figura 7). Esse padrão é resultado direto do crescimento da cultura que altera a resposta espectral devido ao aumento de área foliar.

Figura 7 - Comparação do aumento da altura e NDVI



Vale destacar que, por as estatísticas terem sido calculadas espacialmente para toda a área da cultura, foram observados valores extremos e destoantes. Isso se dá ao fato da alta resolução espacial das imagens, sendo possível distinguir pixels referentes à cana, ao espaçamento entre elas e caminhos entre as culturas, cada um portanto apresentando diferentes respostas espectrais. O desvio padrão evidencia isso, chegando a valores elevados quando a cana ainda está pequena, enquanto diminui ao ficar mais alta, cobrindo o solo (Figura 8).

Figura 8 - Ampliação das imagens das datas 25/11/22 e 28/04/23, respectivamente

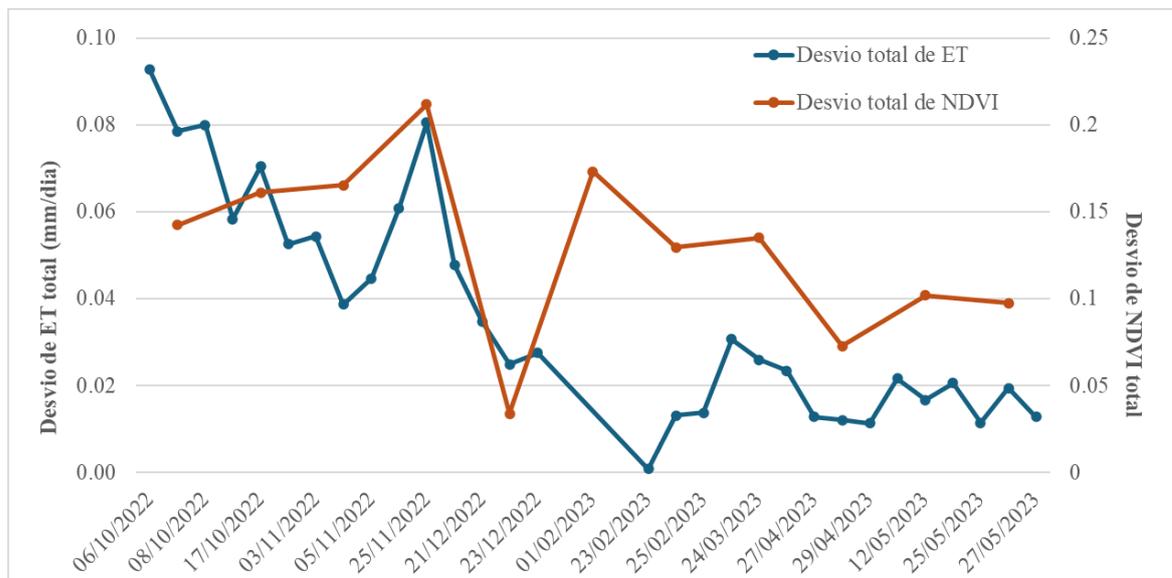


5.2.2. ET

Da mesma forma foram calculadas as estatísticas para as estimativas de ET geradas pelo modelo PT-JPL adaptado, desta vez incorporando também os resultados das janelas adotadas para as datas. No Apêndice E estão organizadas em milímetros as médias das seções e da área total, além dos valores mínimo e máximo, e desvio padrão apenas da área total. O único dia falho na modelagem foi 1 de fevereiro, e por consequência sua janela de tempo associada, devido à ausência de dados na série completa.

Destaca-se das estatísticas o σ da área total tanto para ET como para NDVI (Figura 9), que possuiu um comportamento semelhante, não diferindo muito entre os valores médios das partes e do total.

Figura 9 – Comparação entre desvios entre NDVI e ETe



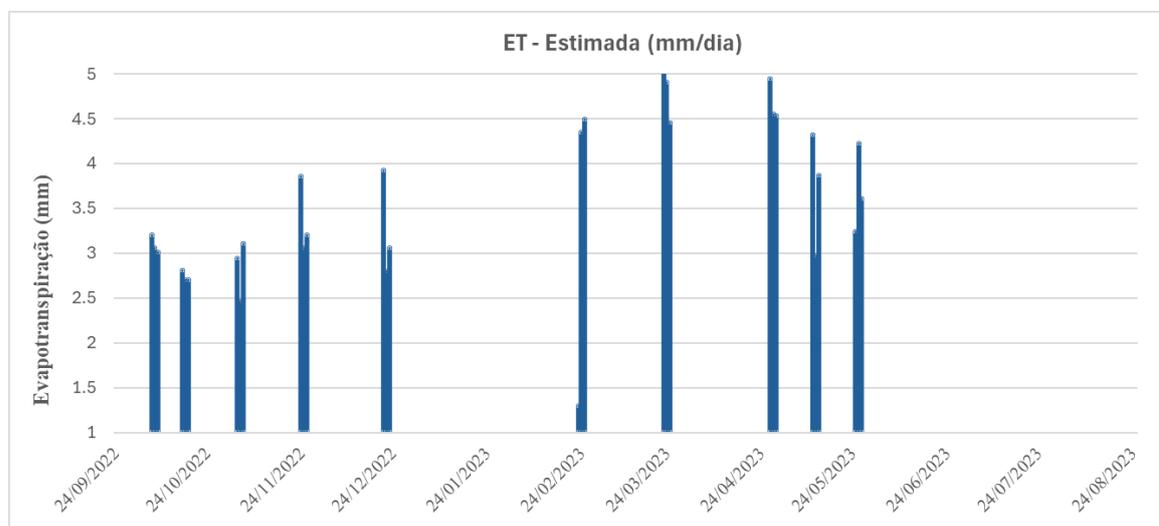
Além disso percebeu-se uma baixa diferença entre os valores médios dos talhões para o total, como observado no σ das médias de NDVI entre as seções que variou entre 0,0012 e 0,0309, bem como os valores do σ da ET total que variaram entre 0,0009 e 0,0928. Isso demonstra a uniformidade da área, independente da variação de lâminas de irrigação aplicadas.

Conjuntamente a ET não varia muito espacialmente, como evidenciado na baixa diferença entre os máximos e mínimos de cada dia. Ainda assim foram notados valores maiores de σ nos meses iniciais devido a variada resposta espectral como já citado para o NDVI.

5.3. EVOLUÇÃO DA ESTIMATIVA DE ET

A ET estimada pelo modelo PT-JPL adaptado, visualizada na Figura 10, obteve um padrão também semelhante ao crescimento da cana. O maior valor atingido foi uma ET diária 5,08 mm em 23 de março, enquanto o menor foi de 1,30 mm em 23 de fevereiro.

Figura 10 - Evolução da ET no período estudado



Foi possível observar que os maiores valores de ET aparecem para momentos em que o crescimento da cana estabilizou em cerca de 2 metros de altura. Nesse período a área do dossel da cultura está em seu ápice, logo havendo muito mais transpiração proveniente da vegetação.

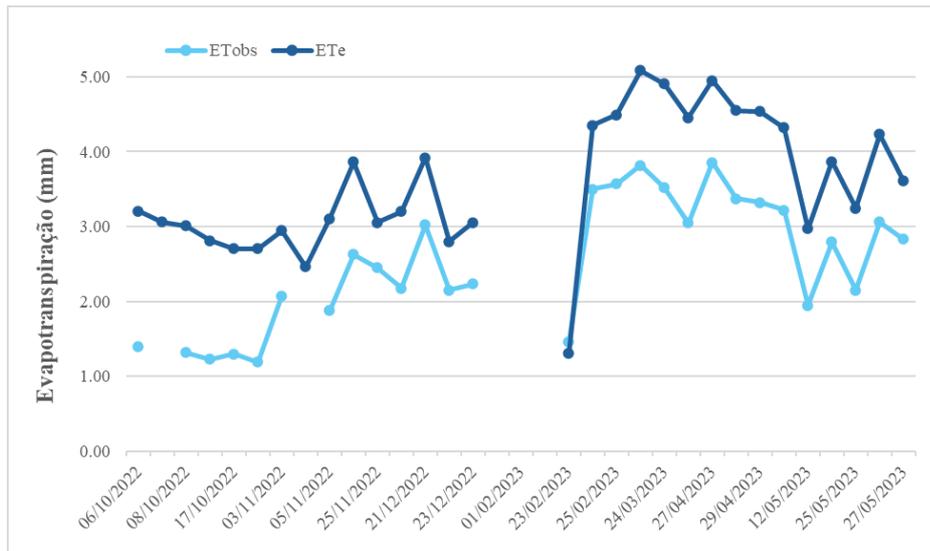
Os máximos também se encontram no início do período chuvoso da região, indicando que ainda não houve influência significativa das chuvas nas estimativas. Esse caso começa a mudar nos valores mais recentes, que decrescem à medida que se aproximam dos meses menos quentes e mais chuvosos.

Foram notadas também grandes variações entre os dias consecutivos de cada janela, estes podendo ser explicados pela variação diária dos parâmetros de entrada micrometeorológicos, em especial a R_n , uma componente principal no modelo.

5.4. COMPARAÇÃO COM A SÉRIE OBSERVADA

Unidas as ETs estimadas pelo PT-JPL e a série de ET_{obs} calculada pelo balanço de energia, foi possível obter suas comparações exibidas na Figura 11, que para a melhor comparação estão dispostos apenas os dias coincidentes.

Figura 11 – Série estimada de ET e comparação com dias respectivos da série observada

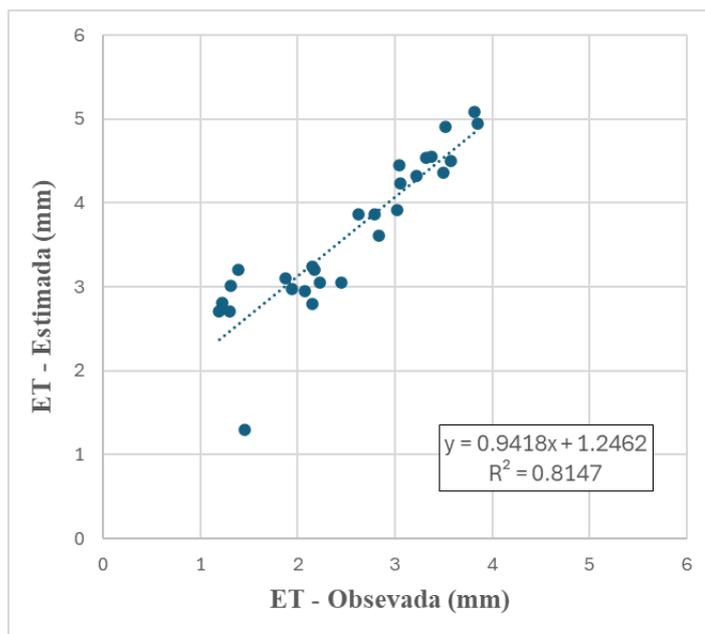


Percebeu-se inicialmente que na maioria das comparações a ETe é superestimada, porém mantém um padrão similar ao da ET_{obs} nos seus dias equivalentes. Esse equilíbrio entre divergências e semelhanças pode estar relacionado aos parâmetros de cada um dos modelos.

A R_n como uma das variáveis principais e comum em ambos os métodos, explica variações semelhantes entre as ETs. No entanto, o PT-JPL se diferencia ao calcular uma ET considerando diversas condições de vegetação, sendo bem mais sensível aos dados de NDVI, temperatura e umidade, como apontado no estudo de Marshall, Tu e Andreo (2020). Sendo assim, é esperado que haja uma diferença significativa de valores devido a consideração da LE em várias parcelas.

Dessa forma, foram calculados para a comparação das séries: a raiz do erro médio quadrático (RMSE), o erro absoluto médio (EAM) e o coeficiente de determinação da correlação (R^2) (Figura 12), obtendo um EAM de 1,11 mm/dia, um RMSE de 2,67 mm/dia, e um R^2 de 0,8147.

Figura 12 - Comparação ETe x ET_{obs}

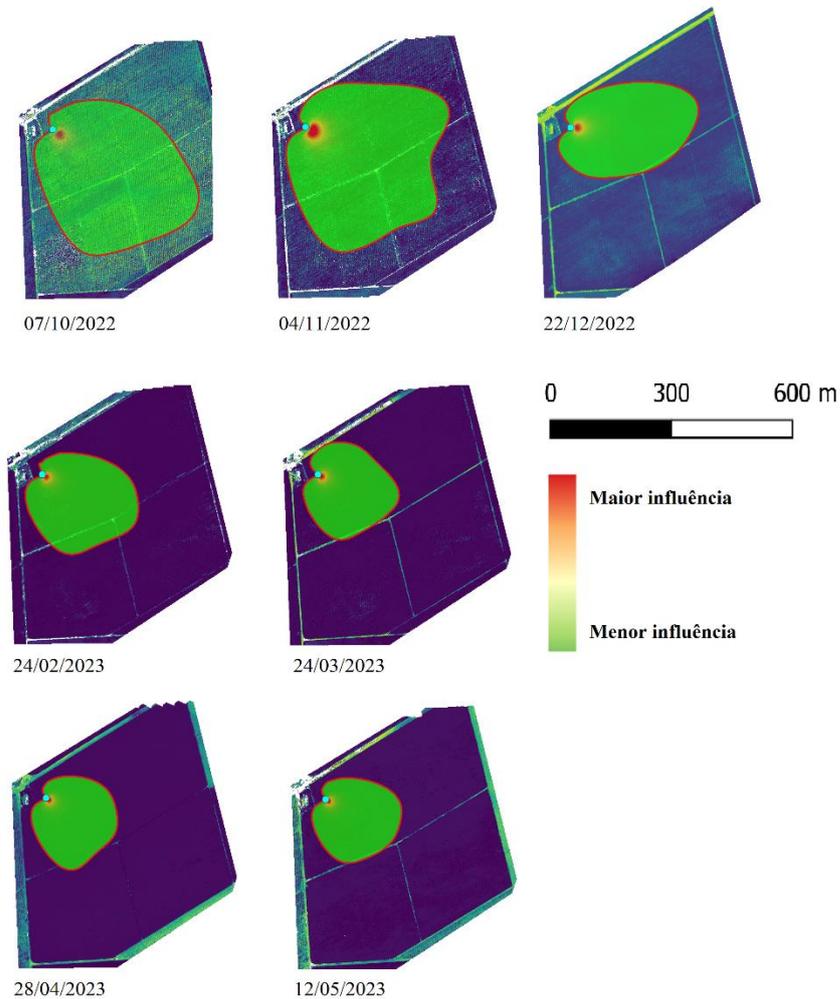


Um estudo por Ershadi et al. (2014), obteve um RMSE de 2,31 mm/dia e R^2 de 0,70 para as estimativas do PT-JPL, sendo este o de melhor desempenho entre os outros métodos usados comparando-se a dados de torres de fluxo. Os valores calculados foram semelhantes, atingindo um R^2 maior, indicando uma boa correlação entre as ETs.

5.5. ANÁLISE DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA

Os FFPs, tais como os ortomosaicos, foram aplicados para seus dias respectivos e para a janela de ± 1 dia. Foram gerados sete dias de FFP, portanto 21 dias de estatística (Figura 13), sendo os dias principais bem espaçados pelo período de estudo, podendo assim englobar de modo eficiente o ciclo da cultura.

Figura 13 - FFPs dos dias principais



Foi observado que a área contribuinte nas medições de fluxo iniciou em quase toda a cultura estudada, mas em maio encontrou-se contida apenas na lâmina de 80 mm. A extensão das áreas diminuiu ao longo do tempo, apresentando um padrão inversamente proporcional ao crescimento da cana.

Atribuiu-se esse comportamento à altura da vegetação devido sua influência direta nas medições de velocidade e direção dos ventos, variáveis usadas no modelo de *footprint*. A comparação entre os resultados da área total e dos FFPs foi disposta no Apêndice F.

Confrontando as médias, não foram constatadas diferenças significativas entre os valores, um padrão que se repetiu nas demais estatísticas, constatando ainda mais a homogeneidade da área, ainda que haja diferentes lâminas de irrigação e tenha havido a redução do FFP.

6. CONCLUSÕES

A adaptação do método PT-JPL permitiu estimar o comportamento da ET diária de forma satisfatória, alcançando erros não muito grosseiros e compatíveis tanto com valores encontrados em literatura como para o tipo de modelo usado no cálculo da ET.

O monitoramento do ciclo fenológico da cana foi também de grande importância, permitindo correlacionar as estimativas com a variação do NDVI e o crescimento da cultura. Além disso, o imageamento de alta resolução da ARP foi fundamental para identificar com maior precisão o comportamento do índice de vegetação e da ET.

Em conjunto, as delimitações dos FFPs e as análises das estatísticas obtidas possibilitaram a confirmação da eficiência das leituras da torre, reforçando que mesmo com seções diferenciadas, a área total pôde ser representada de forma aceitável por parcelas do todo.

Recomenda-se para estudos futuros semelhantes aplicações em áreas maiores e mais heterogêneas, como também um uso mais frequente das ARPs, visando obter um perfil mais preciso da evolução da cultura. Também é sugerido utilizar dados mais tratados, que demandem menos correções de falhas, reduzindo a perda de produtos e a geração de estimativas enviesadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, Ali et al. Remotely piloted aircraft (RPA) in agriculture: A pursuit of sustainability. **Agronomy**, v. 11, n. 1, p. 7, 2020.

ALFACE, Angelo B. et al. Sugarcane spatial-temporal monitoring and crop coefficient estimation through NDVI. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 5, p. 330-335, 2019.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and drainage**, Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1998.

ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 899-920, 2011.

ARAÚJO, A. L. de et al. Modelagem simplificada para estimativa do balanço de energia à superfície em escala regional (R-SSEB). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 433-446, 2017.

ARAÚJO, Wellington Farias; COSTA, Sônia Aparecida Antunes; SANTOS, Antonia Edilene dos. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) PARA. **Revista Caatinga**, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.

BASTIAANSEN, Wim GM et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of hydrology**, v. 212, p. 198-212, 1998.

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

BORGES JÚNIOR, João CF et al. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 16, p. 380-390, 2012.

BRAGANÇA, Rosembergue et al. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso para três localidades no Estado do Espírito Santo. **Idesia (Arica)**, v. 28, n. 2, p. 21-29, 2010.

CAMARGO, ÂNGELO PAES DE; CAMARGO, MARCELO BENTO PAES DE. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v. 59, p. 125-137, 2000.

CHAVES, I. B.; FRANCISCO, P. R. M; MACÊDO, M. L. A. de. Precipitação e erosividade das chuvas do Estado da Paraíba. In: **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**. 2021.

CHU, Housen et al. Representativeness of Eddy-Covariance flux footprints for areas surrounding AmeriFlux sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 301, p. 108350, 2021.

COELHO, André Luiz Nascentes et al. Temperatura de Superfície Celsius do Sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 31-45, 2013.

CUNHA, Fernando França da; MAGALHÃES, Fernando Fagner; CASTRO, Marco Aurélio de. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. **Revista Engenharia na Agricultura-Reveng**, v. 21, n. 2, p. 159-172, 2013.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage**, Paper 24. Rome, 1996.

ERSHADI, Ali et al. Multi-site evaluation of terrestrial evaporation models using FLUXNET data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 187, p. 46-61, 2014.

FISHER, Joshua B.; TU, Kevin P.; BALDOCCHI, Dennis D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 901-919, 2008.

FORMAGGIO, Antonio Roberto; SANCHES, Ieda Del'Arco. **Sensoriamento remoto em agricultura**. Oficina de Textos, 2017.

ISLAM, Shakibul; ALAM, AKM Rashidul. Performance evaluation of FAO Penman-Monteith and best alternative models for estimating reference evapotranspiration in Bangladesh. **Heliyon**, v. 7, n. 7, 2021.

KLJUN, Natascha et al. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 11, p. 3695-3713, 2015.

KLJUN, Natascha; ROTACH, M. W.; SCHMID, H. P. A three-dimensional backward Lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 103, p. 205-226, 2002.

LINS, F. A. C. et al. Análise da dinâmica temporal da evapotranspiração real em uma bacia hidrográfica do semiárido através de modelagem hidrológica e sensoriamento remoto. **Irriga**, v. 26, n. 3, p. 543-564, 2021.

MARSHALL, Michael; TU, Kevin; ANDREO, Veronica. On parameterizing soil evaporation in a direct remote sensing model of ET: PT-JPL. **Water resources research**, v. 56, n. 5, p. e2019WR026290, 2020.

MEDEIROS, R. M. de et al. Variabilidade da temperatura média do ar no Estado da Paraíba-Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 01, p. 128-135, 2015.

MELO et al. Are remote sensing evapotranspiration models reliable across South American ecoregions? **Water Resources Research**, v. 57, n. 11, p. e2020WR028752, 2021.

MOLIN, José Paulo; DO AMARAL, Lucas Rios; COLAÇO, André. **Agricultura de precisão**. Oficina de textos, 2015.

RODRIGUES, Simone Silveira; BARROS, Murilo Machade de, O Uso do VANT e do Sensoriamento Remoto como ferramenta de melhoria das Técnicas de Agricultura de Precisão, In: **Revista Digital Simonsen**, nº10, p. 61, maio, 2019.

SANTOS, Robson Argolo dos. **Modelagem da evapotranspiração da cana-de-açúcar utilizando abordagens de sensoriamento remoto e machine learning**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, 2023.

SILVA, A. de S. **Sensoriamento remoto suborbital de alta resolução no monitoramento do desenvolvimento vegetativo em cana-soca irrigada**. 2023.

SOUSA, Henrique Lima de. Sensoriamento Remoto com VANTs: uma nova possibilidade para a aquisição de geoinformações. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 5, n. 3, p. 326-342, 2017.

TEIXEIRA, A.H. de C. et al. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin,

Brazil: Part A: Calibration and validation. **Agricultural and forest meteorology**, v. 149, n. 3-4, p. 462-476, 2009.

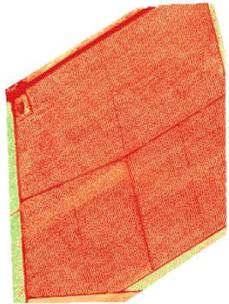
VESALA, Timo et al. Flux and concentration footprint modelling: State of the art. **Environmental Pollution**, v. 152, n. 3, p. 653-666, 2008.

WANG, Sheng et al. Temporal interpolation of land surface fluxes derived from remote sensing—results with an unmanned aerial system. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 7, p. 3643-3661, 2020.

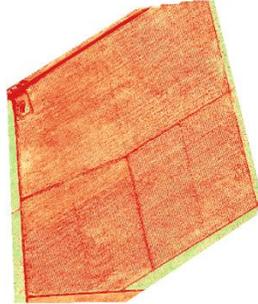
ZHANG, Lilin et al. A global assessment of PT-JPL soil evaporation in agroecosystems with optical, thermal, and microwave satellite data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 306, p. 108455, 2021.

APÊNDICE A - Ortomosaicos de NDVI

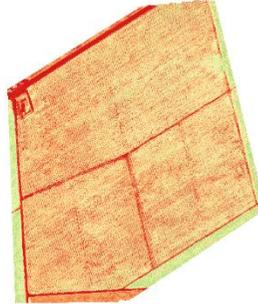
07/10/2022



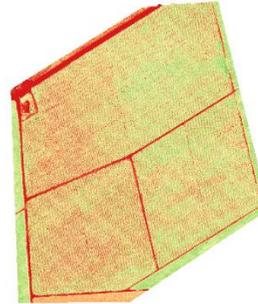
17/10/2022



04/11/2022



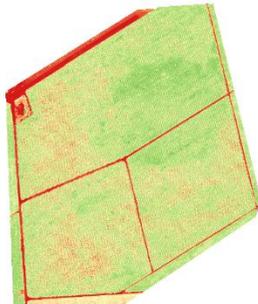
25/11/2022



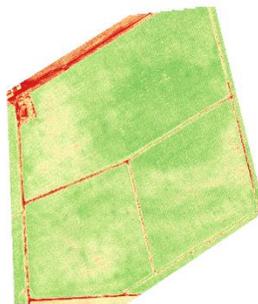
22/12/2022



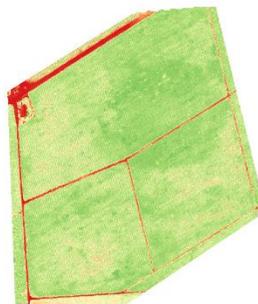
01/02/2022



24/02/2022



24/03/2022



28/04/2022



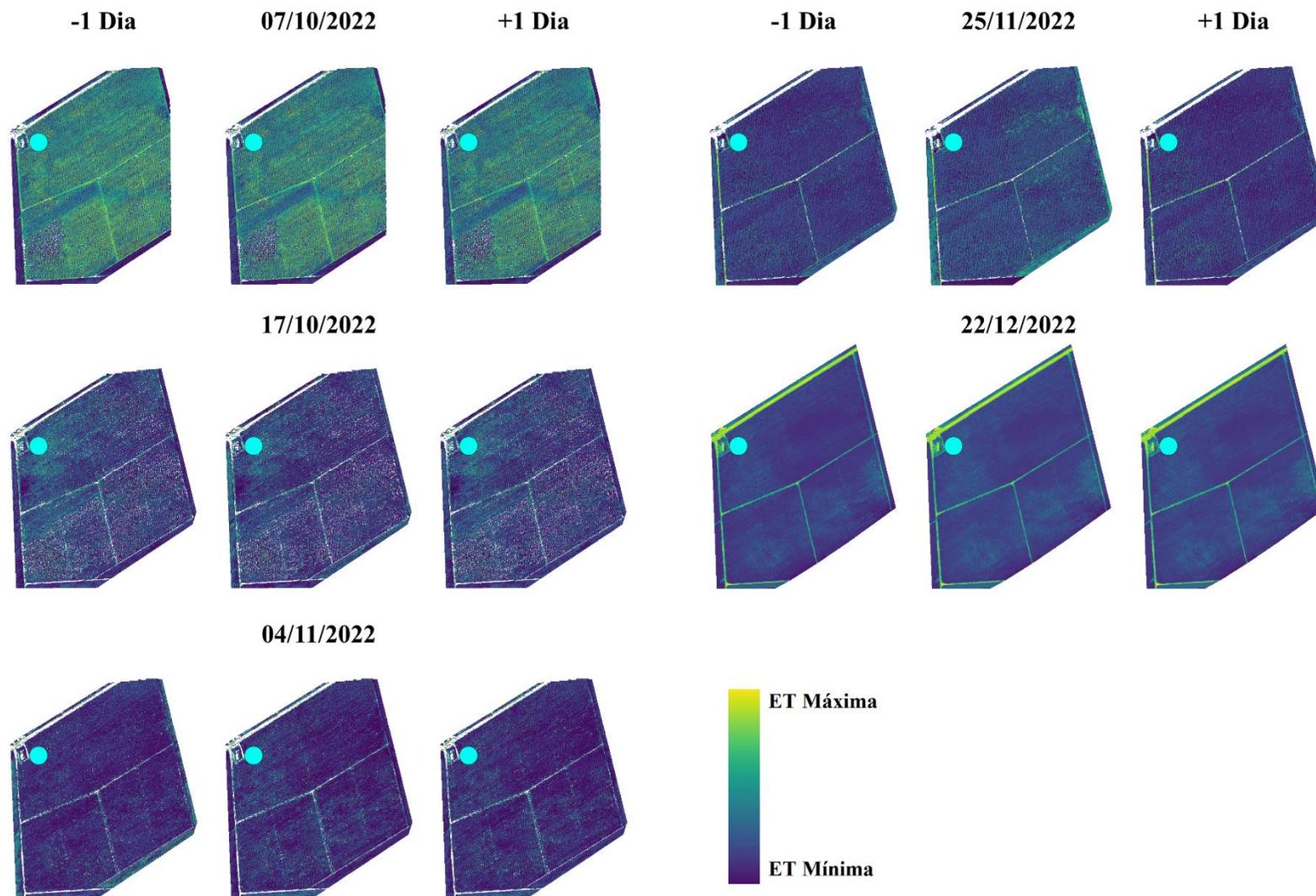
12/05/2022



26/05/2022

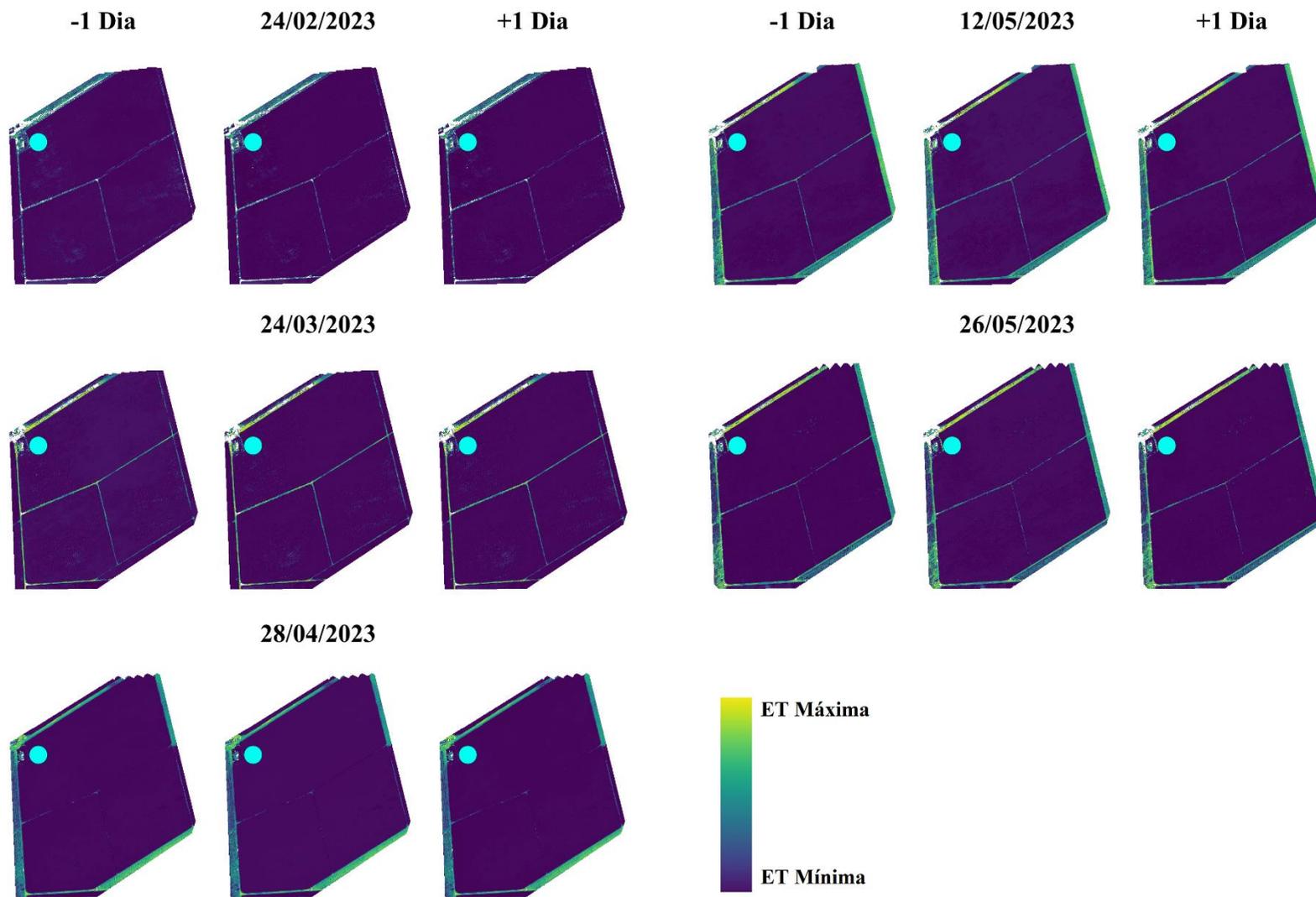


APÊNDICE B - Mapas de ET diária, ano de 2022



* Máx. e mín. referentes aos valores respectivos de cada dia

APÊNDICE C - Mapas de ET diária, ano de 2023



* Máx. e mín. referentes aos valores respectivos de cada dia

APÊNDICE D – Estatísticas zonais de NDVI

		Lam 40	Lam 60	Lam 80	Área Total	σ Total
07/10/2022	Média	0.1532	0.1584	0.1711	0.1634	0.8205
	Desv. P.	0.1416	0.1444	0.1415	0.1425	
	Mín.	-0.2097	-0.1473	-0.2788	-0.2788	
	Máx.	0.7466	0.7805	0.8205	0.8205	
17/10/2022	Média	0.2350	0.2003	0.2307	0.2237	0.0155
	Desv. P.	0.1865	0.1602	0.1434	0.1610	
	Mín.	-0.5264	-0.5398	-0.3810	-0.5398	
	Máx.	0.8034	0.7592	0.8455	0.8455	
04/11/2022	Média	0.3470	0.3146	0.3444	0.3371	0.0147
	Desv. P.	0.1669	0.1643	0.1637	0.1653	
	Mín.	-0.6358	-0.6340	-0.3852	-0.6358	
	Máx.	0.8828	0.8568	0.8533	0.8828	
25/11/2022	Média	0.4803	0.4053	0.4516	0.4470	0.0309
	Desv. P.	0.2039	0.2200	0.2076	0.2118	
	Mín.	-0.2482	-0.2518	-0.3192	-0.3192	
	Máx.	0.8908	0.8741	0.8996	0.8996	
22/12/2022	Média	0.2246	0.2248	0.2273	0.2259	0.0012
	Desv. P.	0.0373	0.0360	0.0307	0.0339	
	Mín.	0.0263	-0.0118	0.0163	-0.0118	
	Máx.	0.4433	0.4384	0.2957	0.4433	

		Lam 40	Lam 60	Lam 80	Área Total	σ Total
01/02/2023	Média	0.5862	0.5488	0.6048	0.5849	0.0234
	Desv. P.	0.1701	0.1768	0.1697	0.1733	
	Mín.	-0.3137	-0.1462	-0.1657	-0.3137	
	Máx.	0.9132	0.8803	0.9045	0.9132	
24/02/2023	Média	0.6492	0.6299	0.6598	0.6489	0.0125
	Desv. P.	0.1221	0.1250	0.1348	0.1295	
	Mín.	-0.3680	-0.4342	-0.5964	-0.5964	
	Máx.	0.9013	0.8723	0.9093	0.9093	
24/03/2023	Média	0.6644	0.6448	0.6774	0.6651	0.0135
	Desv. P.	0.1317	0.1425	0.1308	0.1350	
	Mín.	-0.0988	-0.0889	-0.2610	-0.2610	
	Máx.	0.9271	0.9081	0.9169	0.9271	
28/04/2023	Média	0.7583	0.7838	0.7963	0.7828	0.0159
	Desv. P.	0.0816	0.0761	0.0610	0.0728	
	Mín.	-0.2322	-0.2373	-0.1523	-0.2373	
	Máx.	0.9530	0.9403	0.9609	0.9609	
12/05/2023	Média	0.6757	0.6766	0.7086	0.6913	0.0154
	Desv. P.	0.1105	0.1082	0.0897	0.1020	
	Mín.	-0.1567	-0.1253	-0.2370	-0.2370	
	Máx.	0.9235	0.9145	0.9262	0.9262	
26/05/2023	Média	0.6887	0.6879	0.7051	0.6962	0.0080
	Desv. P.	0.1059	0.1038	0.0875	0.0975	
	Mín.	-0.1267	-0.2018	-0.2585	-0.2585	
	Máx.	0.9246	0.9208	0.9283	0.9283	

APÊNDICE E – Estatísticas zonais de ET (mm/dia)

Datas	Lam 40	Lam 60	Lam 80	Área Total	σ Total	Min.	Máx.
06/10/2022	3.2188	3.2035	3.2073	3.2090	0.0928	3.0368	3.4080
07/10/2022	3.0694	3.0564	3.0591	3.0608	0.0785	2.9206	3.2348
08/10/2022	3.0199	3.0066	3.0089	3.0109	0.0800	2.8721	3.1937
16/10/2022	2.8054	2.8176	2.8173	2.8142	0.0583	2.7420	3.0475
17/10/2022	2.7014	2.7109	2.7089	2.7074	0.0704	2.6260	3.0251
18/10/2022	2.7000	2.7096	2.7087	2.7066	0.0526	2.6437	2.9283
03/11/2022	2.9464	2.9490	2.9499	2.9487	0.0543	2.8900	3.2988
04/11/2022	2.4581	2.4644	2.4608	2.4610	0.0387	2.4227	2.6683
05/11/2022	3.1042	3.1106	3.1073	3.1073	0.0447	3.0630	3.3623
24/11/2022	3.8604	3.8689	3.8586	3.8618	0.0608	3.7793	4.1956
25/11/2022	3.0613	3.0586	3.0543	3.0573	0.0805	2.9473	3.3910
26/11/2022	3.1981	3.2084	3.1982	3.2009	0.0478	3.1393	3.4765
21/12/2022	3.9274	3.9276	3.9245	3.9261	0.0348	3.8436	4.2577
22/12/2022	2.8038	2.8039	2.8017	2.8028	0.0249	2.7367	3.0333
23/12/2022	3.0586	3.0587	3.0563	3.0575	0.0275	2.9851	3.3127
31/01/2023	-	-	-	-	-	-	-
01/02/2023	-	-	-	-	-	-	-
02/02/2023	-	-	-	-	-	-	-
23/02/2023	1.3013	1.3014	1.3013	1.3013	0.0009	1.3007	1.3179
24/02/2023	4.3554	4.3556	4.3552	4.3554	0.0131	4.3485	4.6168
25/02/2023	4.4959	4.4961	4.4957	4.4958	0.0138	4.4883	4.7725
23/03/2023	5.0819	5.0820	5.0825	5.0822	0.0307	5.0623	5.4757
24/03/2023	4.9091	4.9097	4.9091	4.9093	0.0259	4.8971	5.2343
25/03/2023	4.4542	4.4547	4.4541	4.4543	0.0235	4.4435	4.7479
27/04/2023	4.9529	4.9514	4.9505	4.9514	0.0129	4.9431	5.2347
28/04/2023	4.5515	4.5502	4.5494	4.5501	0.0121	4.5407	4.8207
29/04/2023	4.5378	4.5363	4.5355	4.5363	0.0113	4.5302	4.7817
11/05/2023	4.3204	4.3196	4.3196	4.3198	0.0217	4.3081	4.6187
12/05/2023	2.9704	2.9698	2.9700	2.9701	0.0167	2.9596	3.2026
13/05/2023	3.8679	3.8672	3.8670	3.8673	0.0205	3.8568	4.1497
25/05/2023	3.2482	3.2476	3.2473	3.2477	0.0115	3.2431	3.4215
26/05/2023	4.2308	4.2297	4.2296	4.2300	0.0194	4.2184	4.5316
27/05/2023	3.6094	3.6087	3.6084	3.6087	0.0128	3.6032	3.8037

APÊNDICE F – Comparação de estatísticas Área Total x FFP (mm/dia)

Datas	Área Total	σ Total	Mín.	Máx.	Footprint	Desv. P. (Total)	Mín.	Máx.
06/10/2022	3.2090	0.0928	3.0368	3.4080	3.2134	0.0921	3.0368	3.4053
07/10/2022	3.0608	0.0785	2.9206	3.2348	3.0645	0.0781	2.9206	3.2322
08/10/2022	3.0109	0.0800	2.8721	3.1937	3.0145	0.0798	2.8721	3.1908
16/10/2022	2.8142	0.0583	2.7420	3.0475	-	-	-	-
17/10/2022	2.7074	0.0704	2.6260	3.0251	-	-	-	-
18/10/2022	2.7066	0.0526	2.6437	2.9283	-	-	-	-
03/11/2022	2.9487	0.0543	2.8900	3.2988	2.9475	0.0536	2.8900	3.2988
04/11/2022	2.4610	0.0387	2.4227	2.6683	2.4615	0.0392	2.4227	2.6683
05/11/2022	3.1073	0.0447	3.0630	3.3623	3.1076	0.0452	3.0630	3.3623
24/11/2022	3.8618	0.0608	3.7793	4.1956	-	-	-	-
25/11/2022	3.0573	0.0805	2.9473	3.3910	-	-	-	-
26/11/2022	3.2009	0.0478	3.1393	3.4765	-	-	-	-
21/12/2022	3.9261	0.0348	3.8436	4.2577	3.9214	0.0263	3.8786	4.2127
22/12/2022	2.8028	0.0249	2.7367	3.0333	2.7995	0.0189	2.7675	3.0027
23/12/2022	3.0575	0.0275	2.9851	3.3127	3.0538	0.0209	3.0186	3.2788
31/01/2023	-	-	-	-	-	-	-	-
01/02/2023	-	-	-	-	-	-	-	-
02/02/2023	-	-	-	-	-	-	-	-
23/02/2023	1.3013	0.0009	1.3007	1.3179	1.3013	0.0009	1.3007	1.3161
24/02/2023	4.3554	0.0131	4.3485	4.6168	4.3551	0.0128	4.3485	4.5880
25/02/2023	4.4958	0.0138	4.4883	4.7725	4.4955	0.0135	4.4883	4.7419
23/03/2023	5.0822	0.0307	5.0623	5.4757	5.0797	0.0265	5.0623	5.4446
24/03/2023	4.9093	0.0259	4.8971	5.2343	4.9080	0.0222	4.8971	5.2098
25/03/2023	4.4543	0.0235	4.4435	4.7479	4.4532	0.0201	4.4435	4.7259
27/04/2023	4.9514	0.0129	4.9431	5.2347	4.9501	0.0023	4.9431	5.0680
28/04/2023	4.5501	0.0121	4.5407	4.8207	4.5490	0.0020	4.5407	4.6597
29/04/2023	4.5363	0.0113	4.5302	4.7817	4.5351	0.0021	4.5302	4.6387
11/05/2023	4.3198	0.0217	4.3081	4.6187	4.3178	0.0134	4.3081	4.5441
12/05/2023	2.9701	0.0167	2.9596	3.2026	2.9684	0.0104	2.9596	3.1434
13/05/2023	3.8673	0.0205	3.8568	4.1497	3.8654	0.0127	3.8568	4.0798
25/05/2023	3.2477	0.0115	3.2431	3.4215	-	-	-	-
26/05/2023	4.2300	0.0194	4.2184	4.5316	-	-	-	-
27/05/2023	3.6087	0.0128	3.6032	3.8037	-	-	-	-